

**ESTUDIO EXPLORATORIO DE LA VARIACIÓN ESPACIAL DE LAS
CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO ASOCIADAS A UNA VÍA
DE ALTO FLUJO VEHICULAR EN EL SUR DE CALI**



**MARIA PAULA CONDE RIAÑO
2180695**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2021**

**ESTUDIO EXPLORATORIO DE LA VARIACIÓN ESPACIAL DE LAS
CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO ASOCIADAS A UNA VÍA
DE ALTO FLUJO VEHICULAR EN EL SUR DE CALI**



MARIA PAULA CONDE RIAÑO

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Ambiental**

**Director
ANA LASSO
Doctora en Ingeniería**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2021**

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Ambiental

ROSA MARIA GOMEZ

Jurado

Santiago de Cali, 30 de agosto de 2021

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	10
1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	12
2. OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GENERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. METODOLOGÍA	16
3.1 ÁREA DE ESTUDIO.	16
3.2 EQUIPO UTILIZADO	18
3.3 PLAN DE MONITOREO	19
3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE LOS DATOS	20
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS	23
4.1 COMPORTAMIENTO DE LAS CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ EN TODOS LOS PUNTOS DE MONITOREO.	23
4.2 COMPORTAMIENTO DE LAS CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO PM_{2,5} EN TODOS LOS PUNTOS DE MONITOREO.	27
4.3 COMPORTAMIENTO DE LAS CONCENTRACIONES DIARIAS DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ Y PM_{2,5} EN LOS TRES PUNTOS DE MONITOREO	33
4.4 TENDENCIA DE LAS CONCENTRACIONES HORARIAS PARA LOS DÍAS DE LA SEMANA DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ Y PM_{2,5} EN EL PUNTO A	40

4.5 TENDENCIA DE LAS CONCENTRACIONES HORARIAS PARA LOS DÍAS DE LA SEMANA DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ Y PM_{2,5} EN EL PUNTO B	43
4.6 TENDENCIA DE LAS CONCENTRACIONES HORARIAS PARA LOS DÍAS DE LA SEMANA DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ Y PM_{2,5} EN EL PUNTO C	46
5. CONCLUSIONES	49
REFERENCIAS	51

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. <i>Ubicación de sensores en la Universidad Autónoma</i>	17
Figura 2. <i>Vista en planta de los puntos de muestreos ubicados en la Universidad Autónoma de Occidente</i>	18
Figura 3. <i>Concentraciones de PM_{10} en los tres puntos de monitoreo</i>	24
Figura 4. <i>Valores del Índice de la calidad del aire en los tres puntos de muestreo</i>	25
Figura 5. <i>Prueba de normalidad Shapiro Wilk para PM_{10}</i>	26
Figura 6. <i>Concentraciones de $PM_{2,5}$ en los tres puntos de monitoreo</i>	29
Figura 7. <i>Valores del Índice de la calidad del aire en los tres puntos de muestreo</i>	30
Figura 8. <i>Prueba de Shapiro Wilk para $PM_{2,5}$</i>	31
Figura 9. <i>Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ en el punto A</i>	33
Figura 10. <i>Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ en el punto B</i>	34
Figura 11. <i>Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ en el punto C</i>	35
Figura 12. <i>orrelación entre PM_{10} y $PM_{2,5}$ en los tres puntos de monitoreo</i>	38
Figura 13. <i>Comportamiento horario de material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$</i>	41
Figura 14. <i>Tendencia de las concentración de PM_{10} y $PM_{2,5}$ para los días de la semana</i>	42
Figura 15. <i>Comportamiento horario de material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en el punto B</i>	44
Figura 16. <i>Tendencia de las concentración de PM_{10} y $PM_{2,5}$ para los días de la semana en el punto B</i>	45
Figura 17. <i>Comportamiento horario de material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en el punto</i>	47

Figura 18. *Tendencia de las concentración de PM_{10} y $PM_{2,5}$ para los días de la semana en el punto C*

48

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. <i>Sensores utilizados para el muestreo de concentraciones de material particulado</i>	19
Tabla 2. <i>Especificaciones técnicas del sensor AirBeam</i>	19
Tabla 3. <i>Rangos de clasificación de calidad del aire según ICA</i>	21
Tabla 4. <i>Valores obtenidos en la prueba de normalidad para las concentraciones de PM_{10} en cada punto de monitoreo</i>	26
Tabla 5. <i>Análisis estadístico de las concentraciones de PM_{10} en los tres puntos de muestreo.</i>	27
Tabla 6. <i>Valores obtenidos en la prueba de normalidad para las concentraciones de $PM_{2,5}$ en cada punto de monitoreo</i>	31
Tabla 7. <i>Análisis estadístico de las concentraciones de $PM_{2,5}$ en los tres puntos de muestreo</i>	32
Tabla 8. <i>Relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para diferentes ciudades del mundo</i>	37
Tabla 9. <i>Resultados de la correlación y relación entre las partículas finas y gruesas en los tres puntos de monitoreo</i>	39
Tabla 10. <i>Concentración horaria de material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en el punto A</i>	40
Tabla 11. <i>Concentración horaria de material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en el punto B</i>	43
Tabla 12. <i>Concentración horaria de material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en el punto C</i>	46

RESUMEN

La contaminación atmosférica es un tema crítico en las áreas urbanas. Cali es reportada como una de las ciudades con los índices más altos en contaminación atmosférica a nivel nacional, siendo la industria y el transporte los que más aportan a esta problemática. Dado el impacto del transporte en la ciudad, este estudio analizó la variación espacial de material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en la zona de influencia de la vía Cali-Jamundí, la cual es una vía con alta densidad vehicular. Para esto, se realizaron mediciones en tres puntos de monitoreo ubicados dentro de las instalaciones de la Universidad Autónoma de Occidente: A, B y C a 30 m, 193 m y 269 m de la vía. Las concentraciones promedias de PM_{10} para los puntos de monitoreo A, B y C respectivamente fueron de: 19,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 10,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para $PM_{2,5}$ los datos obtenidos fueron de: 13,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 9,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 7,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los resultados obtenidos indicaron variaciones espaciales entre los puntos de monitoreo y el contaminante estudiado. Así mismo, las concentraciones más altas de PM_{10} y $PM_{2,5}$ se observaron en el punto más cercano a la vía principal, mientras que las menores concentraciones fueron obtenidas en el punto más alejado de la vía. Estas variaciones están asociadas principalmente a la influencia de las fuentes móviles en el lugar evaluado, así como las condiciones meteorológicas presentadas en el lugar de estudio durante el periodo de evaluación, de esta manera, es posible evidenciar la contribución de las fuentes móviles a la generación de partículas en el ambiente. Así mismo, este estudio proporciona una base para comprender la calidad del aire en la zona sur de la ciudad de Cali, lo que permite a las diferentes entidades responsables tomar medidas eficientes que controlen y prevengan la contaminación de dicho contaminante.

Palabras clave: Contaminación atmosférica, material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$, fuentes móviles

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es la presencia en el aire de gases y partículas microscópicas que causan problemas de salud en la población. Actualmente, los altos niveles de contaminación siguen siendo peligrosos en diferentes partes del mundo. En Colombia, la población se encuentra expuesta a concentraciones elevadas de contaminantes. Según el Instituto Nacional de Salud (INS) por exposición a aire de mala calidad en Colombia ocurren anualmente cerca de 17,549 muertes en todo el territorio (Instituto Nacional de Salud, 2019). Estas muertes se relacionan con enfermedades como neumonía, bronquitis y cáncer de pulmón, lo cual deja ver que el panorama en Colombia no es nada alentador, puesto que, en algunos puntos del país se están sobrepasando los niveles máximos permisibles de contaminantes atmosféricos.

Uno de los principales contaminantes al que se le atribuye la mala calidad del aire es el material particulado (PM, por sus siglas en inglés). Este contaminante hace parte de los contaminantes criterio que son controlados por las normas de calidad del aire (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2017). La relación del material particulado con los efectos sobre la salud de las personas se pueden asociar a su tamaño. Algunos de los tamaños más estudiados corresponde a partículas con diámetro igual o menor a $10\text{ }\mu\text{m}$ que se les denomina PM_{10} , el cual puede penetrar hasta las vías respiratorias bajas, las partículas de diámetro igual o menor a $2.5\text{ }\mu\text{m}$ ingresan al aparato respiratorio llegando a los alvéolos pulmonares y PM_1 que corresponde a las partículas de diámetro igual o menor a $1\text{ }\mu\text{m}$ que pueden llegar a pasar por el torrente circulatorio (Environmental Protection Agency, 2018).

El material particulado puede ser generado por fuentes naturales como incendios forestales y por fuentes antropogénicas como quemas agrícolas, construcciones y las fuentes móviles que corresponden a los vehículos que funcionan por suministro de combustibles fósiles, es decir, camiones, buses, automóviles y motos. De acuerdo con el DAGMA (2017), las motos aportan un 75% más de contaminantes, que otras fuentes de transportes. Según el DNP (2018), del 2010 al 2015, se tuvo un incremento en la ciudad de un 117% de personas movilizadas en transporte masivo integrado, lo que pudo ocasionar un aumento en las emisiones por fuentes móviles.

Algunos eventos extremos que pueden afectar a la población, por el ejemplo, el incremento de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ en la estación Univalle del DAGMA, podrían asociarse al alto flujo vehicular en el sur de Cali, ya que en promedio pueden transcurrir más de 4.905 vehículos en el día (Cifuentes & Paz, 2015). Esta zona tiene un desarrollo urbano significativo que en conjunto con las obras sobre la vía

Cali – Panamericana pueden incrementar las concentraciones atmosféricas de material particulado generando importantes alteraciones en la calidad del aire, lo que se convierte entonces en una amenaza potencial para la salud de las personas.

En el presente trabajo se propone una metodología detallada para establecer la variación espacial de material particulado asociado al alto flujo vehicular que presenta la vía Cali - Jamundí. Esta metodología establece las diferencias entre las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ cuantificadas en cada punto del muestreo, así como establece la tendencia de las concentraciones en la zona de estudio.

1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

La contaminación atmosférica es un problema que cada día va en aumento trayendo repercusiones en el medio ambiente y la salud de las personas. Hoy en día, la exposición a la mala calidad del aire representa una de las presiones más considerables que mantiene en colapso el sistema de salud pública (Asociación Interamericana de Defensa Ambiental, 2019) siendo entonces este, un gran generador de costos sociales.

La creciente urbanización, el congestionamiento vehicular y los grandes costos de los medios de control han convertido en un problema crucial la contaminación del aire urbano. Por otro lado, el 74% de la población colombiana reconoce la contaminación atmosférica como uno de los problemas más importantes del país (Ramírez et al., 2013), el cual afecta principalmente a la población de bajos recursos. Según un estudio realizado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012), se pudo observar que Latinoamérica tiene concentraciones mayores de PM_{10} que Europa debido a su crecimiento en producción industrial y al alto flujo vehicular asociado al suministro de combustibles de mala calidad.

La evaluación de material particulado por fuentes móviles es un tema de gran importancia para el medio ambiente y la salud de las personas, ya que este contaminante está asociado a enfermedades cardiovasculares y cardiopulmonares. Estudios como el realizado por Krudysz et al. (2008, p. 1) demuestran la importancia de evaluar la exposición a partículas (PM) por la proximidad que se tiene a las fuentes móviles. Por ejemplo, se ha reportado correlación entre los niveles de material particulado PM_{10} ,..... con las enfermedades respiratorias agudas y crónicas que afectan tanto las vías respiratorias altas y bajas de niños y adultos mayores que pueden causar la muerte (Salazar Ceballos & Álvarez Miño, 2011). Así mismo, en una revisión por la Organización Mundial de la Salud se evidenció que una de cada nueve muertes en todo el mundo se debe a la relación entre la exposición crónica a material particulado y efectos a nivel pulmonar, donde se encontró que el 36% de las muertes son por cáncer de pulmón y el 35% por enfermedades pulmonar obstructiva crónica. Por otra parte, estudios realizados por García et al. (2006) se centran en la variación espacial de material particulado en la ciudad de Santa Marta Colombia, donde se puede evidenciar que entre los distintos puntos se encuentran diferencias en las concentraciones de los contaminantes que se relacionan con la dinámica del viento y los diferentes tipos de fuentes que existen. Además, en vías de diferente densidad de flujo vehicular y con actividades de demolición y construcción, se han encontrado diferencias espaciales en las cuales las zonas con menor flujo vehicular presentan concentraciones de contaminantes atmosféricos más bajas que los sitios con mayor cantidad de vehículos (Amato et al., 2008).

Por otro lado, en la ciudad de Medellín se realizaron diferentes mediciones con el fin de determinar las concentraciones de fondo de material particulado, así como su variación espacial y temporal, con el propósito de proponer acciones claras sobre los programas de vigilancia, obteniendo como resultado, variaciones de las concentraciones de metales como calcio, magnesio y hierro (Echeverri, 2000). Según las estimaciones de las emisiones de material particulado proveniente de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, se pudo evidenciar que las mayores concentraciones de PM se presentaron sobre las vías con mayor tránsito vehicular a las 12:00 horas del mediodía los días martes y viernes (Londoño et al., 2011). Por otra parte, en estudios realizados por Valdivia (2016) sobre la variación espacial y temporal de material particulado por fuentes móviles en Lima Metropolitana se pudo evidenciar que los promedios anuales de PM_{10} y $PM_{2,5}$ en casi todas las estaciones de monitoreo sobrepasaban las normas de calidad del aire. Así mismo, en un estudio realizado en la ciudad de Pereira se analizó la correlación entre las concentración de PM_{10} con las fuentes móviles, en donde se encontró que los valores más altos de concentración de dicho contaminante son estadísticamente mayores en horas pico de la tarde entre las 5pm y las 7 pm (Pinzon & Arias, 2016). Además, estudios realizados por Gonzáles (2018) muestran que en horas picos del día, el porcentaje de viaje en potencia positiva disminuye generando de esta forma una congestión vehicular con aumentos en las concentraciones de PM_{10} . Además, en los días no hábiles las concentraciones de material particulado son menores que la de los días hábiles. Así mismo, en una comparación entre tres muestreadores de material particulado $PM_{2,5}$ ubicados en la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM) se encontró que las mayores concentraciones de este se presentaron a las 10:00 am y 22:00, lo que coincidió con el alto flujo vehicular que se presenta en esa zona, por otro lado, los valores más bajos se presentaron los día domingos y lunes y los máximos valores los días martes (Castelar, 2019).

A nivel local, es un hecho que en los últimos años en la ciudad de Cali se está viviendo un aumento considerable del parque automotor. Según datos reportados por el observatorio MOVIS Observatorio de movilidad sostenible (2018) durante el periodo 2017 hubo un incremento del 2,4% de los vehículos que circulan por la ciudad, lo cual ha generado un escenario de congestión vehicular, particularmente en vías principales para la movilidad, lo que conlleva a un incremento en los niveles de contaminación atmosférica, principalmente por material particulado, afectando la salud de la población.

Así mismo, aunque se han realizado estudios en cuanto a la contaminación atmosférica en Cali, las fuentes móviles cada día van en aumento y no se tienen datos específicos sobre la variación de la exposición de los contaminantes provenientes de estas fuentes con respecto a las vías principales de la ciudad. Es por esto, que se propone el presente estudio como una aproximación a la situación actual que se presenta sobre la variación de la exposición a los contaminantes

provenientes de estas fuentes con respecto a las vías principales de la ciudad. Teniendo en cuenta esto, se propone el presente estudio como una aproximación a la situación actual que se presenta sobre la variación de las concentraciones de material particulado ocasionado por las fuentes móviles en una vía de alta densidad vehicular. De esta manera será posible analizar las concentraciones a las cuales están expuestos los habitantes que residen o están temporalmente en esta zona. Por otro lado, con este proyecto la comunidad podrá obtener datos que permitan reconocer la calidad del aire en la zona sur de la ciudad, así como se espera que esta información sirva como un primer acercamiento que permita a la autoridad ambiental plantear otras investigaciones de mayor alcance.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ asociadas al flujo vehicular en la vía Cali-Jamundí, para el estudio de la variación espacial de los contaminantes atmosféricos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ a 30, 193 y 269 m de la vía en estudio.
- Establecer las diferencias entre las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ y cuantificadas en cada punto de muestreo.
- Establecer la tendencia de las concentraciones del material particulado en la zona de estudio.

3. METODOLOGÍA

La metodología que a continuación se describe explica el paso a paso para la evaluación de las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ asociadas al alto flujo vehicular para el estudio de la variación espacial de los contaminantes atmosféricos.

3.1 ÁREA DE ESTUDIO.

El área de estudio seleccionada es la vía Cali-Jamundí por su alto flujo vehicular. En esta zona fueron seleccionados 3 puntos de muestreo dentro de la Universidad Autónoma de Occidente ya que se contaba con una mayor seguridad de los equipos, de esta misma manera, se tuvo en cuenta que los equipos estuvieran al alcance de una red wifi, así como la cercanía de esta con la vía y la importancia que tiene la evaluación de las concentraciones de material particulado a la que están expuestos los estudiantes y personal que diariamente transita por la universidad. Adicionalmente, esta es una zona de expansión urbana en crecimiento. Así mismo, se pueden establecer las diferencias entre las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ en cada punto de muestreo y la correlación que tienen estas con una vía altamente transitada.

En la figura 1 se presenta la ubicación de los sensores dentro de la Universidad Autónoma de Occidente. El primer punto se ubica en la portería principal a 30 metros sobre la vía de estudio, el segundo punto en el lago cerca a portería vehicular de empleados y visitantes a 193 m de la vía Cali-Jamundí y por último, el tercer punto fue ubicado en el cuarto de máquina cerca a la salida tres, con una distancia de 269 m. Todos los puntos de muestreo se encontraban a una altura entre 2 y 2,5 metros.

Figura 1.

Ubicación de sensores en la Universidad Autónoma



A



B



C

Nota. A) Sensor Portería principal, B) Sensor Lago, C) Sensor Portería tres.

En la figura 2 se presenta la vista en planta de los puntos de muestreo ubicados en la universidad Autónoma de Occidente.

Figura 2.

Vista en planta de los puntos de muestreos ubicados en la Universidad Autónoma de Occidente



Nota. Tomado de. Google s. f. mapa de google ubicación Universidad Autónoma de Occidente.

Los puntos de interés, son los sitios donde se encuentran ubicado los sensores AirBeam, los cuales serán los encargados de monitorear la concentración de material particulado en la zona de estudio.

3.2 EQUIPO UTILIZADO

Para el presente estudio se utilizaron muestreadores AirBeam. Estos son instrumentos de calidad del aire, del tamaño de una mano y de bajo costo, que tiene como función, la medición de concentraciones de material particulado PM_1 , $PM_{2.5}$ y PM_{10} , las cuales son dañinas para el medio ambiente y la salud de las personas, así mismo, los sensores AirBeam tienen la capacidad de medir la temperatura y humedad del mismo. El diseño del sensor AirBeam permite que este pueda estar expuesto a diferentes condiciones meteorológica lo cual genera una mayor precisión y eficiencia a la hora de recopilar los datos. En la tabla 1 se presenta la identificación de los sensores utilizados, como la identificación asignada a los equipos en el proyecto, esto con el fin de tener una mayor facilidad en el entendimiento.

Los sensores utilizados fueron configurados siguiendo las instrucciones dadas en Habitat Maps (Habitat Map, 2021), y se realizaron pruebas preliminares que quedaron registradas en “AirCasting.org” con el fin de evaluar de manera preliminar el funcionamiento y almacenamiento de los datos. Las especificaciones técnicas de los sensores AirBeam se presenta en la tabla 2.

Tabla 1.

Sensores utilizados para el muestreo de concentraciones de material particulado

Sensor	Identificación del sensor	Identificación en el proyecto
AirBeam 1	AirBeam2:0011E40007F0	UAO Ppal
AirBeam 2	AirBeam2:0011E40006C5	UAO Lago
AirBeam 3	AirBeam2:0011E400077C	UAO P3

Tabla 2.

Especificaciones técnicas del sensor AirBeam

Tipo de sensor	Dispersión de luz
Peso	5 onzas (141.748 gramos)
Batería	2000 mAh 3,7 V, 10 horas de duración
Fuentes de alimentación	Puerto micro USB
Registro de datos y comunicación	Bluetooth, Wifi, Celular
Humedad relativa sensor	Si
Temperatura sensor	Si

Nota. Tomado de: Guía de usuario: Por: Habitat Map, 2021.
<https://www.habitatmap.org/airbeam/users-guide>

3.3 PLAN DE MONITOREO

El proyecto se realizó en el primer semestre del año 2021. Durante este periodo se evaluó a lo largo de 9 semanas la variación de las concentraciones de los contaminantes, en donde los sensores AirBeam estuvieron ubicados las 24 horas del día en cada punto seleccionado, lo cual permitió el análisis de las variaciones de acuerdo a las actividades que se realizan en la zona sur de la ciudad de Santiago de Cali y al flujo vehicular. En ese tiempo se estableció las diferencias entre las concentraciones de material particulado cuantificadas en cada punto de monitoreo.

Con el fin de definir los sitios más representativos para el estudio de la calidad del aire asociado al material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ se realizó un estudio preliminar en la Universidad Autónoma de Occidente para determinar que puntos tenían mayor cercanía con la vía y las actividades realizadas, así como la conexión a una toma corriente para mantener el muestreo continuo las 24 horas del día. Además, se realizó un día de prueba con el fin de verificar el comportamiento y los datos arrojados por el equipo.

El sensor AirBeam cuenta con una plataforma de visualización de datos “AirCasting”, la cual recopila mediciones monitoreadas por el dispositivo, y las transmite a los mapas, permitiendo mapear la calidad del aire en un punto determinado. Una vez recopilada las mediciones, el programa AirCasting permite exportar el archivo a cualquier correo electrónico para la visualización de los datos monitoreados. Con el fin de evaluar las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ monitoreadas por el sensor AirBeam, se determinó descargar los archivos diarios del sensor A, B y C durante todo el periodo de evaluación.

El periodo de monitoreo proyectado se establece siguiendo las recomendaciones del protocolo para el monitoreo de la calidad del aire (Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial, 2008) para el establecimiento de estaciones indicativas de la calidad del aire.

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE LOS DATOS

Los datos obtenidos del monitoreo mediante la aplicación AirCasting se almacenaron en archivos de Excel, estos datos fueron arrojados por el sensor minuto a minuto durante las 24 horas del día de cada día que se llevó a cabo el análisis. Teniendo en cuenta esto, para el análisis de los datos fue necesario agrupar los datos en horas y posteriormente en días, sacando el promedio horario y diario respectivamente para llevar a cabo una mejor interpretación de estos. Además de esto, se realizó una corrección por presión y temperatura a condiciones de referencia colombiana.

Así mismo, se realizó el análisis de los datos teniendo en cuenta la validez de los mismos de acuerdo al Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2010).

Por otra parte, se realizó un análisis de los niveles de calidad del aire en cada punto de muestreo, los cuales fueron determinados con base al índice de la calidad del

aire (ICA) que establece los niveles de las concentraciones registradas de la calidad del aire a partir de una escala numérica que varía entre 0 y 500.

Con el fin de realizar una adecuada evaluación del ICA de la información recolectada para el desarrollo de la presente investigación, fue establecido el valor promedio diario de la información registrada por el sensor AirBeam en los tres puntos de muestreo durante todo el periodo de evaluación.

Tabla 3.

Rangos de clasificación de calidad del aire según ICA

Rango	Color	Clasificación
0-50	Verde	Buena
51-100	Amarillo	Aceptable
101-150	Naranja	Dañina a la salud de grupos sensibles
151-200	Rojo	Dañina para la salud
201-300	Púrpura	Muy dañina para la salud
301-500	Marrón	Peligroso

Nota. Tomado de: Resolución 2254 del 2017. Por. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2017<https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res-2254-de-2017.pdf>

Este índice fue calculado mediante la ecuación 1.

Ecuación 1.

Cálculo del índice de la calidad del aire (ICA)

$ICA_p = \frac{I_{alto} - I_{bajo}}{PC_{alto} - PC_{bajo}} * (C_p - PC_{bajo}) + I_{bajo}$	<p>ICA_p = índice de la calidad del aire para el contaminante p C_p = Concentración media para el contaminante p I_{alto} = Valor del ICA establecido en la norma I_{bajo} = Valor del ICA establecido en la norma PC_{alto} = Punto de corte mayor o igual C_p PC_{bajo} = Punto de corte menor o igual C_p</p>
--	---

Nota. Tomado de: Resolución 2254 del 2017. Por. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2017<https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res-2254-de-2017.pdf>

Además, se realizaron análisis de comparación y correlación de los datos, mediante una prueba Shapiro-Wilk para analizar la distribución de las muestras, posterior a esto, se realizó una prueba de Mann-Whitney en donde se determinó si hay diferencias significativas entre un punto y otro. En cuanto a la prueba de normalidad (Shapiro-Wilk) si $P > \alpha$ se acepta la hipótesis nula y se demuestra que la variable de la cual se extrajo la muestra sigue una distribución normal, pero si $P < \alpha$ la muestra no seguiría una distribución normal. Lo contrario sucede cuando se analiza la prueba de Mann-Whitney, en donde se comparó el valor (P-value), el cual es la probabilidad de tener un valor significativo con respecto a la otra muestra con el nivel de significancia (α) el cual es la probabilidad de rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa. Por lo que si $P > \alpha$ se acepta la hipótesis nula y se afirma que no existe variación significativa entre una muestra y la otra, pero si por el contrario $P < \alpha$ se acepta la hipótesis alternativa y se demuestra que hay una variación significativa entre una muestra y la otra. Cabe mencionar que (α) adopta un valor de 0,05.

El análisis de los datos se orientó a:

- Cálculo de promedios diarios y horarios de PM_{10} y $PM_{2.5}$ para todos los datos recopilados en el periodo de monitoreo en los tres puntos de evaluación.
- Comparación con la norma diaria de calidad del aire para PM_{10} y $PM_{2.5}$
- Comparación estadística de las concentraciones de PM_{10} entre los tres puntos de evaluación
- Comparación estadística de las concentraciones de $PM_{2.5}$ entre los tres puntos de evaluación
- Cálculo de la relación $PM_{10} / PM_{2.5}$ en cada uno de los puntos evaluados.

El análisis de los datos, fue llevado a cabo empleando herramientas estadísticas de tipo descriptivo, diagrama de cajas y bigotes de las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 COMPORTAMIENTO DE LAS CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ EN TODOS LOS PUNTOS DE MONITOREO.

Las concentraciones de PM₁₀ obtenidas en el monitoreo de los tres puntos evaluados (A, B y C) se encuentran en la gráfica 1. Las mediciones del punto A estuvieron afectadas por la seguridad y la estabilidad de la conexión a la energía eléctrica, la disponibilidad de infraestructura segura para la ubicación del sensor y factores meteorológicos, por lo cual se presentó una interrupción en las mediciones. No obstante, se mantuvieron las mediciones en los otros puntos de monitoreo siguiendo el plan definido. De acuerdo a la información presentada en la gráfica, se puede observar que los valores arrojados por el sensor AirBeam en el punto A muestra en una franja determinada que no hay datos representados, esto debido a dificultades técnicas asociadas a eventos climatológicos presentadas en la ciudad de Santiago de Cali que desencadenaron caída de material vegetal en el punto A que ocasionó la interrupción de los datos. Así mismo, es posible evidenciar que las más altas concentraciones de PM₁₀ se presentan en el punto A, el cual es el punto más cercano a la vía Panamericana, y por tanto el punto de mayor exposición a las emisiones de las fuentes móviles. Adicionalmente, esta gráfica permite evidenciar que el punto B presenta mayores concentraciones de material particulado grueso en comparación con el punto C. Las diferencias en las concentraciones entre los puntos de monitoreo se pueden asociar a la distancia a las fuentes móviles de material particulado. Acorde con Valdivia (2016), los puntos de monitoreo de PM₁₀ más cercanos de vías de alto flujo vehicular y a las calles sin pavimentar presentan mayores concentraciones de dicha fracción.

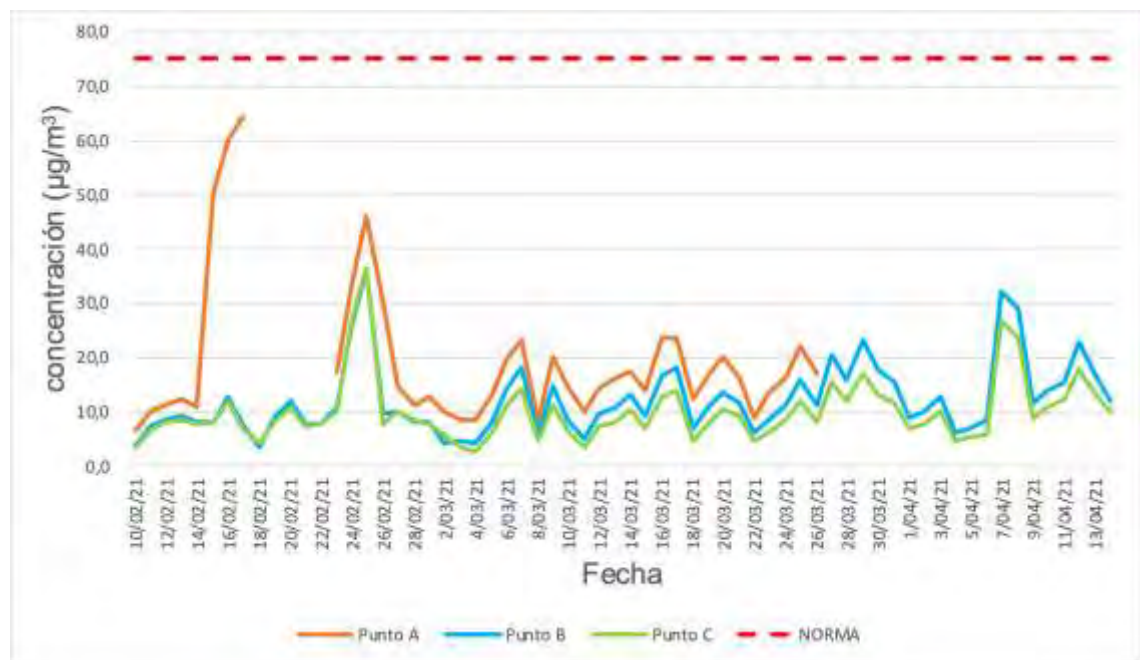
Por otro lado, el punto B está ubicado en la carrera 115 la cual no tiene un flujo vehicular alto comparado con el que se presenta en la vía Cali-Jamundí. Por tanto, es de esperar que las concentraciones fueran menores que las del punto A. Esto mismo sucede entre el punto A y el C, siendo el punto C el punto más lejano de la vía principal con alto flujo vehicular. En relación con eso Chun et al. (2020) encontraron que sectores alejados de las vías principales presentan concentraciones menores en ambientes urbanos.

En la gráfica 1 se puede observar que las concentraciones más altas se presentaron en el punto A el 17/02/21 con un valor de 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el punto B y C presentaron las mayores concentraciones el 25/02/21 teniendo el punto C una concentración mayor que el punto B con un valor de 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, mientras que los valores más bajos presentados por el punto A, B y C fueron de 6,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 3,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 2,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el orden dado. El valor elevado registrado en el punto A se puede relacionar con actividades de remoción de

material de construcción que se encontraba almacenado en esta vía. Con respecto a la norma diaria de calidad del aire para Colombia se puede evidenciar que ninguna de las mediciones promedias diarias exceden la norma diaria establecida en la resolución 2254 del 2017, la cual dice que para un tiempo de exposición de 24 horas el nivel máximo permisible de PM_{10} es de $75 \mu g/m^3$, sin embargo, se debe tener en cuenta que los valores registrados durante el periodo de medición están asociados a condiciones de pandemia, considerando que, hubo una disminución en el flujo vehicular posiblemente por las medidas de aislamiento establecidas por el gobierno nacional durante esta época

Figura 3.

Concentraciones de PM_{10} en los tres puntos de monitoreo



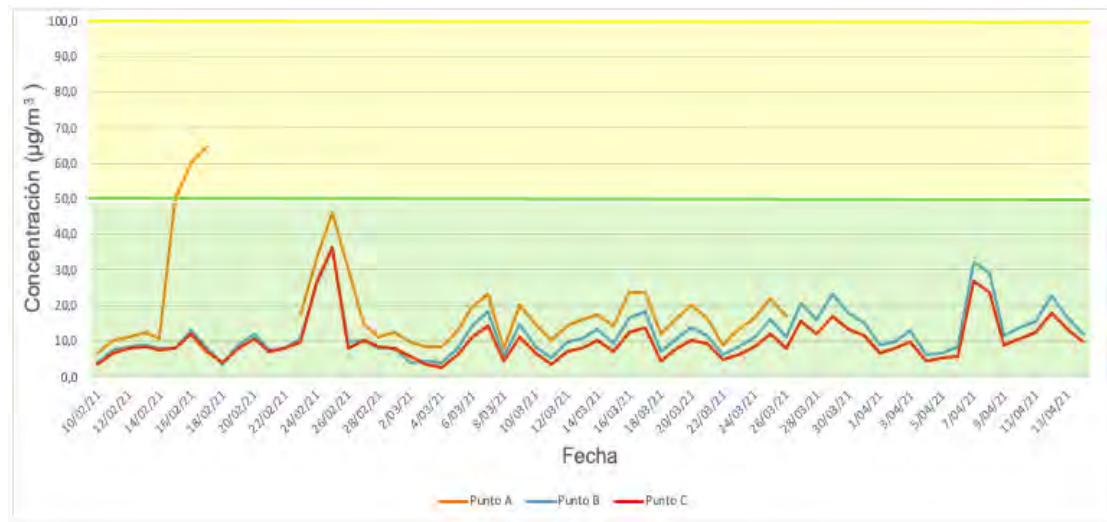
Nota: Todos los valores se encuentran reportados a 1atm y 25°C

Además, fue calculado el índice de la calidad del aire (ICA). Este índice fue seleccionado debido a que se considera apropiado para llevar a cabo el análisis de la calidad del aire en los tres puntos de monitoreo. Dicho esto, es posible ver en la gráfica 2 los valores del índice de la calidad del aire en los tres puntos de muestreo, en donde se puede concluir con base a la información arrojada por el ICA que los tres puntos de monitoreo para PM_{10} se encuentran dentro de la clasificación del aire buena con un color verde y entre el rango de 0 a 50 a excepción del 15 y 16 de febrero, los cuales se encuentran por encima de este rango, indicando entonces,

que para estos dos días se tuvo una calidad del aire aceptable. Esta clasificación del aire en la mayoría de los días se ajusta a los lineamientos establecidos por la EPA y la OMS (Ministerio para el Medio Ambiente, 2016) los cuales son valores planteados para evitar efectos adversos en la salud humana y del ambiente.

Figura 4.

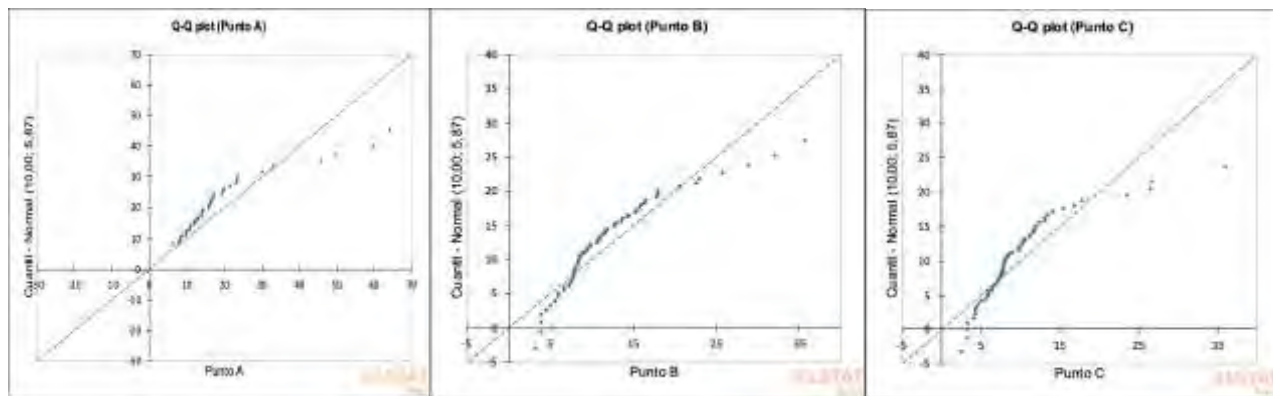
Valores del Índice de la calidad del aire en los tres puntos de muestreo



La comparación de los tres puntos de monitoreo requirió de una prueba de normalidad para seleccionar una prueba paramétrica o no paramétrica con el fin de comprobar la heterogeneidad de las tres muestras. En la gráfica 3 se presenta la prueba de normalidad realizada para los datos de las concentraciones de material particulado PM₁₀.

Figura 5.

Prueba de normalidad Shapiro Wilk para PM_{10}



En la tabla 4 se presentan los resultados de la prueba de normalidad en cada punto de muestreo. Los datos obtenidos en cada variable permite ver que en todos los puntos el valor del P-valué es menor a alfa, lo cual indica que se rechaza la hipótesis nula de igualdad, demostrando así, que los datos no tienen una distribución normal.

Tabla 4.

Valores obtenidos en la prueba de normalidad para las concentraciones de PM_{10} en cada punto de monitoreo

Variable	Media	Desv. típica	P- Valué	Alfa
Punto A	12,184	14,305	<0,0001	0,5
Punto B	12,109	6,658	<0,0001	0,5
Punto C	10,001	5,914	<0,0001	0,5

Nota. Puesto que el valor P-Valué es menor que el nivel de significancia alfa:0,05, se debe rechazar la hipótesis nula, y aceptar la hipótesis alternativa H_a .

Teniendo en cuenta que los datos obtenidos no presentan una distribución normal, se realizó una prueba no paramétrica (Mann-Whitney) de las concentraciones de PM_{10} en los tres puntos de monitoreo el cual se presenta en la tabla 5, con el fin de determinar si hay diferencias estadísticamente significativas entre un punto y otro.

Tabla 5.

Análisis estadístico de las concentraciones de PM_{10} en los tres puntos de muestreo.

	PUNTO A	PUNTO B		PUNTO A	PUNTO C		PUNTO B	PUNTO C
Media	19,49	12,10		19,49	10,00		12,10	7,86
Desviación típica	13,57	6,65		13,57	5,91		6,65	4,08
P- Valué	0,0001			0,0001			0,021	
Alfa	0,05			0,05			0,05	

Nota. Puesto que el valor P-Valué es menor que el nivel de significancia alta:0,05, se debe aceptar la hipótesis alternativa H_a y rechazar la hipótesis nula.

Teniendo en cuenta los datos arrojados, se puede evidenciar en la tabla 5 con respecto a la comparación entre los puntos A y B que P es menor a alfa (α) por lo que es posible afirmar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre dichos puntos. Esto mismo sucede cuando se compara A y C y B y C en donde se obtuvieron valores menores al valor de significancia alfa, siendo entonces A y B estadísticamente significativo con respecto a C. Por tanto, con los resultados obtenidos de estas comparaciones se puede decir que las diferencias de las concentraciones de PM_{10} en los puntos de monitoreo están relacionadas con la distancia a la vías y su flujo vehicular, como única fuente representativa a nivel local del contaminante en estudio.

4.2 COMPORTAMIENTO DE LAS CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO $PM_{2,5}$ EN TODOS LOS PUNTOS DE MONITOREO.

Los resultados obtenidos de las concentraciones de la fracción fina de material particulado para los tres puntos de monitoreo se encuentra en la gráfica 5. Es posible evidenciar que la más alta concentración de $PM_{2,5}$ en el punto A se presentó antes de la interrupción de los datos el día 16/02/21 . Además, dicho punto, presentó las más altas concentraciones de material particulado fino con respecto al punto B y C, esto se puede relacionar con la cercanía que tiene el punto A con la vía principal de alto flujo vehicular que contribuye a la emisión de material particulado, a diferencia de los puntos B y C que se encuentran a una mayor distancia. Este comportamiento coincide con los de Pope et al (2018) donde el principal aporte de material particulado se debe al aporte del tráfico vehicular en las vías principales de las ciudades, contribuyendo cerca del 90% de la contaminación del aire en entornos urbanos. Así mismo, es posible evidenciar que las menores concentraciones de la fracción fina de material particulado fueron presentadas por los puntos B y C, esto se puede asociar a condiciones climáticas presentadas en la ciudad, donde se

presentaron mayores vientos, lo que permite la recirculación del material particulado.

Por otra parte, si comparamos las concentraciones obtenidas entre el punto B y C, encontramos que el segundo punto obtuvo mayores concentraciones que el punto C, teniendo en cuenta, que el punto C está ubicado cerca a la portería 3 de la universidad Autónoma de Occidente donde no se tiene un flujo constante de fuentes móviles. Por ejemplo, en estudios realizados por Chun et al (2020) encontraron que entre más lejos esté el punto de las vías principales con alto tráfico vehicular menores son las concentraciones de $PM_{2,5}$ en ambientes urbanos.

Con relación al comportamiento y la dirección del viento en el área de influencia del proyecto los datos fueron suministrados por el DAGMA y corresponden a la estación Univalle. Para el periodo de monitoreo se presentaron vientos entre 0,6 y 1,3 m/s, sin embargo, durante el periodo de monitoreo hubieron días en los que se presentaron vientos que excedieron los 3,5 m/s en donde las porciones de masas de aire contaminado se pueden mover en la dirección del viento, la cual predominaba hacia el Sur-Este, generando entonces un transporte de contaminantes hacia la zona de estudio, en donde se pudo provocar una recirculación del material particulado.

Además de eso, es posible evidenciar el análisis comparativo de las concentraciones diarias de $PM_{2,5}$ con respecto a la norma diaria de calidad del aire en Colombia. Donde se puede observar que las más altas concentraciones para el punto A, B y C fueron de $35 \mu g/m^3$, $25 \mu g/m^3$ y $25,9 \mu g/m^3$ respectivamente, mientras que los valores más bajos fueron de $5,1 \mu g/m^3$, $2,6 \mu g/m^3$ y $3,1 \mu g/m^3$ en el mismo orden. Por lo tanto, es posible afirmar que ninguna de las mediciones promedio diarias exceden la norma diaria establecida en la resolución 2254 del 2017, la cual dice que para un tiempo de exposición de 24 horas el nivel máximo permisible de $PM_{2,5}$ es de $37 \mu g/m^3$.

Figura 6.

Concentraciones de $PM_{2,5}$ en los tres puntos de monitoreo

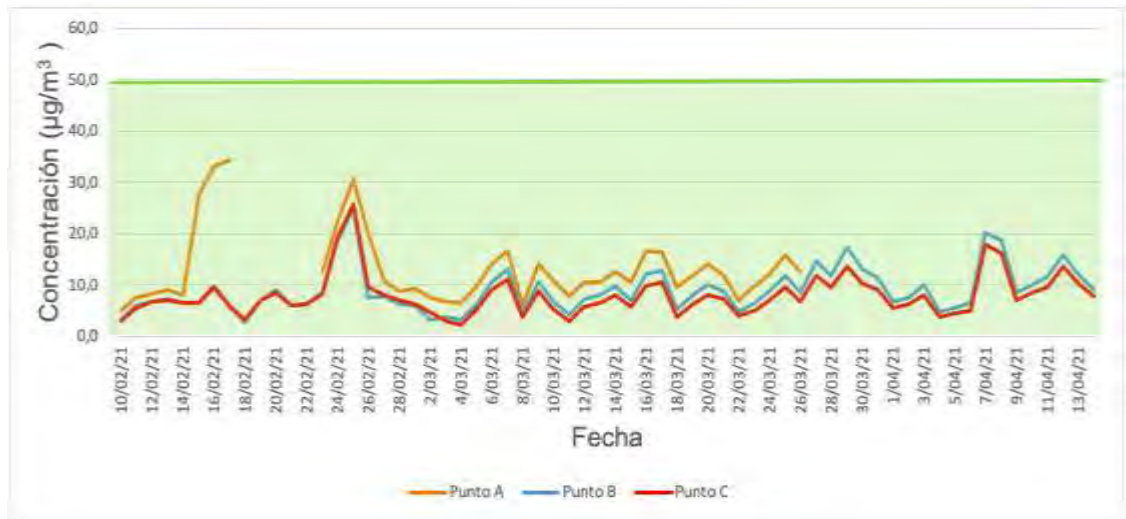


Teniendo en cuenta las concentraciones registradas por el sensor AirBeam en los diferentes meses de monitoreo, se llevó a cabo el análisis del ICA en los tres puntos de estudio, de manera que sea posible evidenciar cómo es la calidad del aire en dichos puntos permitiendo saber si es propicio llevar a cabo actividades en el exterior o si es necesario implementar medidas para tener una mejor calidad del aire y de esta forma una mejor calidad de vida. A partir de esto, el valor del ICA, fue obtenido mediante la ecuación 1 y su clasificación de la calidad del aire fue establecida según la escala numérica que reporta la ley 2254 del 2017 la cual se puede observar en la tabla 3.

De esta manera, es posible evidenciar en la gráfica 5 los valores del índice de la calidad del aire con respecto a la fracción fina de material particulado en los tres puntos de muestreo

Figura 7.

Valores del Índice de la calidad del aire en los tres puntos de muestreo



De acuerdo a la información presentada en la gráfica 5, es posible evidenciar en los tres puntos de monitoreo que la cantidad de concentración de PM_{2.5} presente en el aire no sobrepasan el rango de 0 a 50, teniendo entonces, una calidad del aire buena la cual está asociada a un color verde. Así mismo, se puede decir que los estudiantes de la Universidad Autónoma de Occidente y personas que transitan por esta zona no están expuestas a una calidad del aire mala, con elevadas concentraciones de material particulado fino que estén por encima de este rango y supongan un riesgo para la salud humana.

Se llevó a cabo la comparación de la distribución de los datos mediante una prueba Shapiro- Wilk en cada punto de muestreo, con el fin de determinar si los datos analizados en cada variable presentan una distribución normal. En la gráfica 8 se presenta la gráfica obtenida para el conjunto de datos estudiados en cada punto de estudio.

En la tabla 6 se presentan los datos obtenidos de la prueba de normalidad, en donde se puede evidenciar que en cada uno de los puntos monitoreados el valor del P-valor es menor al valor de alfa, por lo que es posible afirmar que los datos modelados no presentan una distribución normal.

Figura 8.

Prueba de Shapiro Wilk para PM_{2.5}

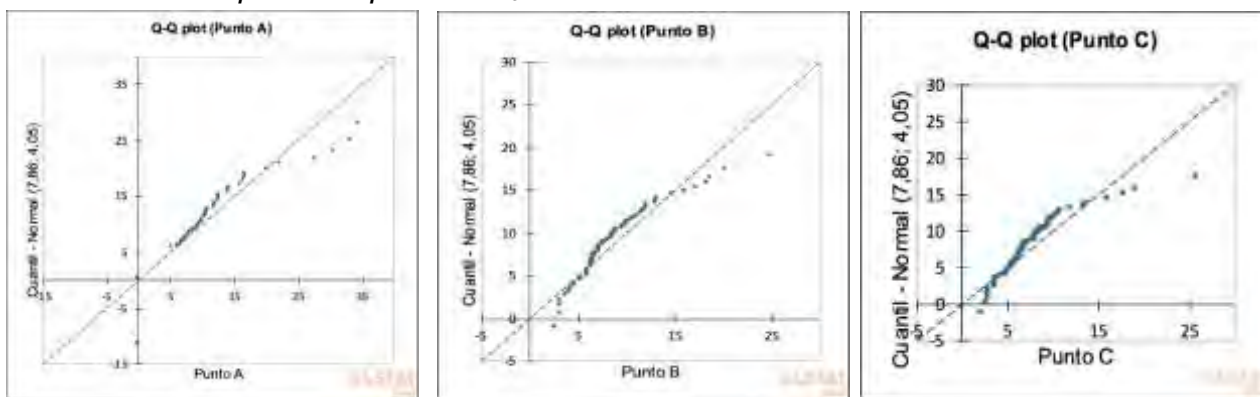


Tabla 6.

Valores obtenidos en la prueba de normalidad para las concentraciones de PM_{2.5} en cada punto de monitoreo

Variable	Media	Desv. típica	P- Valué	Alfa
Punto A	8,288	14,305	<0,0001	0,5
Punto B	8,964	6,658	<0,0001	0,5
Punto C	7,860	5,914	<0,0001	0,5

Nota. Puesto que el valor P-Valué es menor que el nivel de significancia alfa:0,05, se debe rechazar la hipótesis nula, y aceptar la hipótesis alternativa Ha.

Teniendo en cuenta los datos arrojados por la prueba Shapiro - Wilk se realizó una prueba no paramétrica de las concentraciones de PM_{2.5} en los tres puntos de muestreo la cual se presenta en la tabla 7. Este análisis se llevó a cabo mediante una prueba Mann-Whitney con el fin de establecer si hay una diferencia significativa de un punto con respecto al otro, por lo que en cuanto mayor sea la magnitud de T, mayor será la evidencia en contra de la hipótesis nula, significando entonces, que habrá una mayor evidencia para aceptar la hipótesis alternativa, demostrando de esta forma que hay una variación significativa entre un punto y otro.

Tabla 7.

Análisis estadístico de las concentraciones de $PM_{2,5}$ en los tres puntos de muestreo

	PUNTO A	PUNTO B		PUNTO A	PUNTO C		PUNTO B	PUNTO C
Media	13,26	8,96		13,26	7,86		8,96	7,86
Desviación típica	7,22	4,39		7,22	4,08		4,39	4,08
P- Valué	0,0001			0,0001			0,091	
Alfa	0,05			0,05			0,05	

A partir de lo dicho anteriormente, se puede observar en la tabla 7 con respecto al punto A y B y A y C que se obtuvo un valor de P menor al valor de alfa, de esta manera es posible afirmar que el punto A presenta valores significativos con respecto a B. Lo contrario sucede cuando se compara B y C donde se demuestra que la magnitud de B no es lo suficientemente grande para que haya una variación significativa entre estos dos puntos, esto se puede asociar a que el punto C se encontraba cerca a procesos de demolición y trabajos de construcción, lo que ocasionó un aumento en una de las fracciones de material particulado, así mismo, durante el periodo de monitoreo se presentaron fuertes precipitaciones. Por ejemplo en un estudio realizado por Rojas (2006) en diferentes puntos de la ciudad de Bogotá se presentaron mayores valores de la fracción gruesa de material particulado que de la fracción fina, esto debido a que algunos puntos de monitoreo se encontraban cerca a procesos de construcción generando un aumento de la fracción gruesa, además, dichos puntos estuvieron expuestos a precipitaciones, lo que indica que cuando llueve existe más material particulado grueso en la atmósfera, debido a que la lluvia puede lavar una parte de la fracción fina presente en el aire. Por lo tanto, con los resultados obtenidos en las comparaciones de cada punto para la fracción fina de material particulado, se puede decir que las concentraciones de $PM_{2,5}$ en los puntos de monitoreo están asociadas al flujo vehicular presente en la zona y a actividades presentadas cerca a los puntos de estudio.

4.3 COMPORTAMIENTO DE LAS CONCENTRACIONES DIARIAS DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ Y PM_{2,5} EN LOS TRES PUNTOS DE MONITOREO

La gráfica 7 presenta las concentraciones diarias de PM₁₀ y PM_{2,5} en el punto A. Los resultados obtenidos en el monitoreo para este punto presentaron una variación en las concentraciones promedio diarias al inicio del periodo de evaluación, con concentraciones elevadas de PM₁₀ y PM_{2,5}, estas concentraciones altas se puede relacionar a ciertas condiciones atmosféricas, o la presencia de algunas fuentes contaminantes cercanas a la zona de estudio (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2010)

Figura 9.

Concentraciones de PM₁₀ y PM_{2,5} en el punto A



Así mismo, en la gráfica 8 se presentan las concentraciones promedio diarias de PM₁₀ y PM_{2,5} en el punto B para el periodo de monitoreo. Los valores obtenidos por los sensores de bajo costo AirBeam muestran en unas determinadas franjas la elevación de las concentraciones de las fracciones de material particulado grueso y fino al igual que sucede en el punto A, en donde la principal fuente de estas fracciones probablemente sea el tráfico vehicular dado la cercanía que tiene el sensor con las vías principales. Por ejemplo, diferentes estudios realizados sobre la distribución de material particulado han identificado que la fuente principal de PM₁₀ y PM_{2,5} son las emisiones que se tienen del parque automotor y el polvo arrastrado por el viento (Lim et al., 2019), así mismo, se ha encontrado que el tráfico vehicular disminuye la velocidad de los vehículos aumentando la frecuencia de parada-

arranque, lo que conduce a una liberación adicional de partículas. Además el incremento del parque automotor en esta zona genera un desgaste vial, y un acabamiento de los neumáticos y los frenos, que según Han & Sun (2019) son una fuente importante de partículas.

Figura 10.

Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ en el punto B



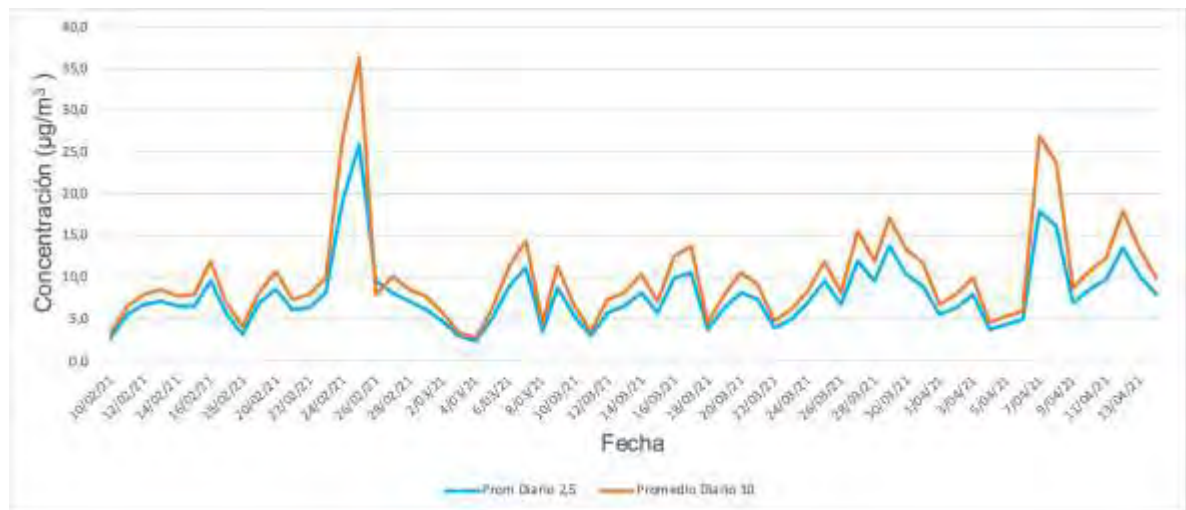
Esto mismo fue encontrado en el punto C, como se puede evidenciar en la gráfica 9, donde se encuentran las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ para dicho punto. Los resultados obtenidos muestran como hay una tendencia al crecimiento de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ como sucede en el punto A y B, en donde se observa que para el punto C del 21 al 24 de febrero se presentan las más altas concentraciones de las fracciones de este contaminante

Por otro lado, el análisis realizado en los tres punto de monitoreo permitió caracterizar las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$, observándose que los contaminantes presentan una gran variabilidad para los diferentes días de la semana tal y como lo plantea (Feenstra et al., 2019), esto se relaciona principalmente con las concentraciones emitidas al aire por las fuentes móviles en las vías principales de la zona. Así mismo, la evaluación espacial realizada durante el periodo de monitoreo, mostró disminuciones en las concentraciones promedias diarias de PM_{10} y $PM_{2,5}$ con niveles menores a 6,8 y 5,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el punto A, en cuanto al punto B los descensos en las concentraciones llegaron hasta a tener valores inferiores a 3,4 y 2,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ al igual que en el punto C; esto debido a que se ha presentado una disminución en la circulación de los vehículos que transitan por

la vía de influencia. Igualmente, y partiendo de que los vehículos de transporte público continúan su operación normal, la disminución de las concentraciones de material particulado se encuentran directamente relacionadas con las condiciones climatológicas presentadas en la ciudad durante el periodo de evaluación

Figura 11.

Concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ en el punto C



Adicionalmente, durante las épocas de lluvia las concentraciones de material particulado disminuyen, teniendo en cuenta, que durante los meses de febrero, marzo, abril, mayo; septiembre, octubre y noviembre se producen las dos épocas de lluvia que enfrenta el país con un régimen binomial, produciendo así que las concentraciones de la fracción gruesa y fina de material particulado descieran.

Por otra parte, los valores obtenidos en las gráficas 7, 8 y 9 mostradas anteriormente, muestran una tendencia en las concentraciones promedias diarias de material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en el periodo de evaluación a excepción de los picos más altos que se presentaron debido a lo mencionado anteriormente.

Así mismo, se puede evidenciar en los tres puntos de monitoreo (A, B y C) que las concentraciones de la fracción gruesa de material particulado son mayores a las fracciones finas, sin embargo, a pesar de que las concentraciones de PM_{10} son mayores, estas no superan la norma de calidad del aire en ninguno de los puntos de muestreo. De acuerdo a esto, es posible afirmar que los estudiantes de la universidad Autónoma de Occidente como las personas que transitan por esta zona

presentan una menor exposición por la fracción fina de material particulado la cual trae mayores repercusiones en la salud de las personas debido a que llegan más profundo en el sistema respiratorio.

Por otro lado, a pesar de que la prueba Mann-Whitney no arrojó diferencias significativas entre el punto B y C, es posible evidenciar en la gráfica 8 y 9 que si existe una disminución de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ entre un punto y otro. Esto nos muestra, que la variación espacial de dicho contaminante depende de la distancia y las condiciones climáticas presentadas en el lugar de monitoreo.

Según Lim et al., (2019), las concentraciones de contaminantes del aire pueden variar notablemente en distancias pequeñas y periodos cortos de tiempo, por otro lado, el entorno urbano no puede caracterizarse y analizarse completamente utilizando información de los sistemas de vigilancia de la calidad del aire (SVCA), por lo que se puede decir que los SVCA pueden monitorear el impacto de los contaminantes a nivel urbano, pero los equipos portátiles permiten proveer información complementaria con una alta resolución, siendo entonces estos, una base conceptual para evaluar la exposición de los peatones a las partículas (Piotrowicz & Polednik, 2019) y la variación espacial de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$, el cual es uno de los enfoques de esta investigación.

Por otro lado, el análisis realizado en este punto de monitoreo permitió caracterizar las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$. Existen relaciones entre el tamaño de las partículas y sus fuentes. Las partículas con diámetros superiores a $10\ \mu m$ provienen de procesos mecánicos como la erosión, trituración, molienda y la dispersión producida por el viento, mientras que las partículas entre 1 y $10\ \mu m$ de diámetro están asociados a los procesos de combustión (Echeverri Londoño & Maya Vasco, 2008). La relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ ha sido calculada por diversos estudios llevados a cabo en ciudades latinoamericanas y del mundo, en donde se establece que una relación igual o mayor a 0.59 sería esperable bajo la influencia directa de fuentes de combustión, como lo son las fuentes móviles (Querol et al., 2004). En la tabla 8 se presenta algunos de los valores encontrados por diferentes autores para la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en diferentes ciudades del mundo.

Tabla 8.

Relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para diferentes ciudades del mundo

Ciudad	Relación $PM_{2,5} / PM_{10}$
Ciudad de México, México	0.50 - 0.70
Santiago, Chile	0.40 - 0.70
Birmingham, Reino Unido	0.50 - 0,80
Sydney, Australia	0.29 - 0.53
Hong Kong, China	0.53 - 0.78
Bogotá, Colombia	0.19 -0.73
Bogotá, Colombia	0.60
Bucaramanga, Colombia	0.61
Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Colombia	0.60
Cali, Colombia	0.59

Nota. Valores obtenidos y reportados por Rojas et al., (2006) y Larsen (2003) para Colombia.

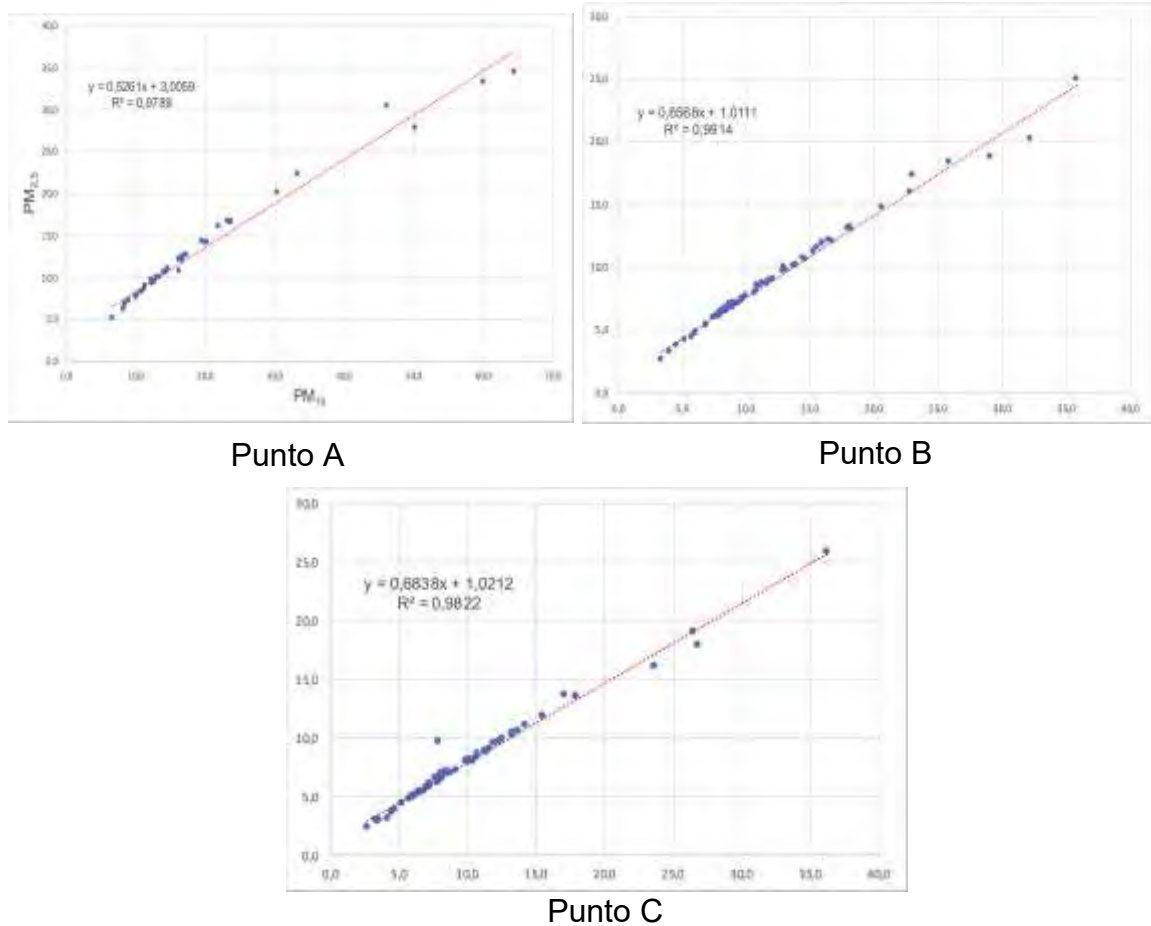
Esta relación permite estimar la concentraciones de un parámetro conociendo el otro, por lo que si se conoce esta relación en una ciudad o punto específico, se contaría con parte de información necesaria para tomar acciones más eficientes del control de las fuentes móviles. Teniendo en cuenta esto, se llevo acabo el cálculo de la fracción PM_{10} y $PM_{2,5}$ en los tres puntos de monitoreo.

Mediante una gráfica de regresión lineal se halla el coeficiente de determinación (R^2) el cual explica el porcentaje de variabilidad de las partículas de la fracción fina $PM_{2,5}$ en función de la fracción gruesa PM_{10} . El coeficiente de determinación toma valores entre 0 y 1, de esta forma, entre más se aproxime a 1, significa que el modelo lineal explica mejor la situación.

En la grafica 10 se presenta la correlación de las partículas finas y gruesas en los tres puntos de monitoreo. Según los datos obtenidos es posible evidenciar que los tres puntos de monitoreo explican la variabilidad de las partículas finas en función de las partículas gruesas, en donde el punto que mejor representa esta variabilidad es el punto B. Así mismo, la diferencia entre 100 y R^2 es aquel porcentaje de variabilidad de las partículas finas que no es explicado por las partículas gruesas, como por ejemplo la precipitación.

Figura 12.

Correlación entre PM_{10} y $PM_{2,5}$ en los tres puntos de monitoreo



Así mismo, en la tabla 9 se presentan los resultados de la correlación entre las concentraciones de las partículas $PM_{2,5}$ y PM_{10} , así como la relación entre estas dos partículas. En cuanto al coeficiente de Pearson, un coeficiente mayor de 0,90 permite afirmar que el responsable del incremento o reducción de las partículas de material particulado $PM_{2,5}/PM_{10}$ es el mismo tipo de fenómeno (Echeverri Londoño & Maya Vasco, 2008), además, sería posible predecir datos de las de la fracción fina a partir de los datos obtenidos por la fracción gruesa. Teniendo en cuenta lo dicho, y los datos obtenidos para este coeficiente, es posible evidenciar que los tres puntos de monitoreo obtuvieron un coeficiente de Pearson mayor a 0,90 por lo que es posible predecir datos de una variable a partir de la otra.

Tabla 9

Resultados de la correlación y relación entre las partículas finas y gruesas en los tres puntos de monitoreo

Punto de muestreo	Regresión Lineal R^2	Relación $PM_{2,5}/PM_{10}$	Coefficiente de Pearson
A	0,978	0,680	0,989
B	0,991	0,740	0,995
C	0,982	0,785	0,991

Así mismo, los valores obtenidos para la relación de $PM_{2,5}/PM_{10}$ en los diferentes puntos de muestreo concuerdan con lo encontrado en otras investigaciones, donde afirman que una relación superior a 0,60 sería esperable bajo la influencia de fuentes de combustión, sin embargo, es posible evidenciar que el punto A el cual está ubicado a 30 m de la vía Jamundí obtuvo el menor valor, esto se debe a que en el periodo de medición, la vía Jamundí se encontraba sometida a constantes trabajos de construcción vial, el cual tiene procesos de excavación, fundición de concreto, entre otros, dichos eventos afectaron la relación de $PM_{2,5}/PM_{10}$ aumentando la cantidad de la fracción gruesa de material particulado en la zona. Esto concuerda con lo encontrado por (Rojas et al., 2006) en un estudio realizado en la ciudad de Bogotá, en donde el punto más cercano a la vía presentó el menor valor de la relación de $PM_{2,5}/PM_{10}$, este punto se encontraba sujeto a varios procesos de construcción para el sistema de Transmilenio lo cual afectó indudablemente los resultados de la relación de dichas fracciones, teniendo como consecuencia una relación menor para este punto.

El punto B y C presentaron las más altas relaciones $PM_{2,5}/PM_{10}$ lo cual indica la presencia de fuentes de combustión en la zona. El coeficiente de Pearson de 0,995 y 0,991 respectivamente, permite afirmar que es posible predecir adecuadamente los datos de $PM_{2,5}$ a partir de los datos de PM_{10} . Esto mismo sucede con el punto A el cual presentó un coeficiente de Pearson de 0,989.

4.4 TENDENCIA DE LAS CONCENTRACIONES HORARIAS PARA LOS DÍAS DE LA SEMANA DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ Y PM_{2,5} EN EL PUNTO A

La tabla 10 presenta las concentraciones promedio horarias de material particulado PM₁₀ y PM_{2,5} en el punto A. Las concentraciones de estas fracciones para este punto estuvieron en el rango de 6,4 a 65,9 µg/m³ donde la mayor concentración se registro el día lunes a las 18:00 pm con un valor de 65,9 µg/m³ para PM₁₀ y 33,8 µg/m³ para PM_{2,5}, las concentraciones más bajas se registraron el día sábado para ambas fracciones, esto debido a la disminución del flujo vehicular en días no laborales. Este comportamiento coinciden con el estudio realizado por Zhao et al., (2018), donde a partir de un análisis espacio-temporal de las concentraciones de material particulado, encontraron que las concentraciones son mayores de lunes a viernes y descienden los fines de semana. Por otro lado, la tendencia indica que los niveles de PM₁₀ y PM_{2,5} son más bajos en horas de la madrugada, aumentando paulatinamente en horas de la mañana y disminuyendo en horas de la tarde, sin embargo, en horas de la noche estas concentraciones vuelven a incrementarse.

Tabla 10

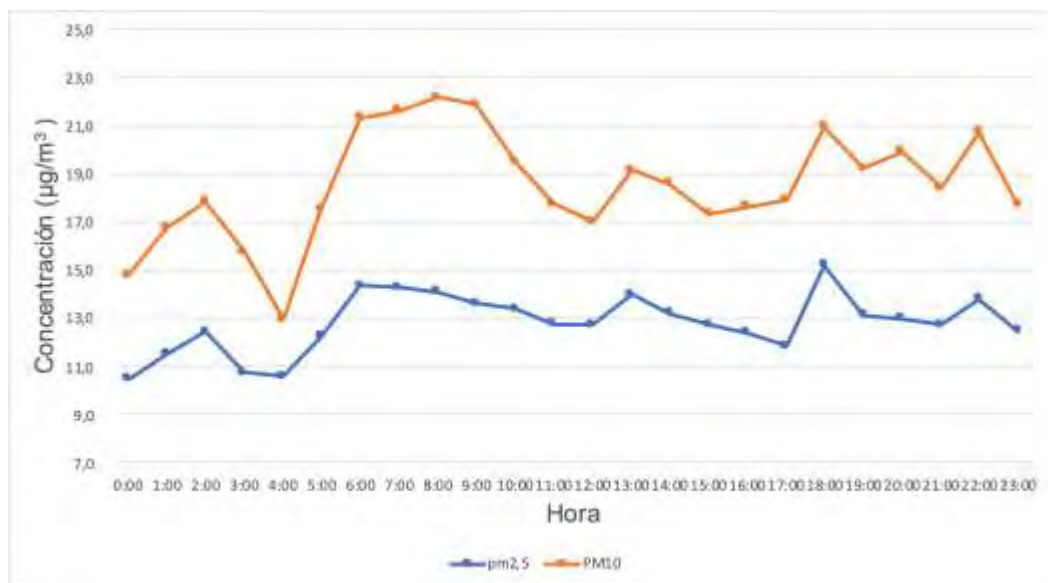
Concentración horaria de material particulado PM₁₀ y PM_{2,5} en el punto A

	<i>Lunes</i>		<i>Martes</i>		<i>Miércoles</i>		<i>Jueves</i>		<i>Viernes</i>		<i>Sábado</i>		<i>Domingo</i>	
HORA	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5
0:00	19,3	14,1	22,6	13,9	14,9	11,1	14,7	10,0	11,5	8,0	8,2	6,4	12,2	9,1
1:00	18,7	13,8	26,5	16,0	27,0	17,2	13,7	9,4	12,2	8,5	8,0	6,3	11,2	8,4
2:00	16,8	12,6	32,8	18,8	30,0	17,9	12,6	8,8	12,1	8,8	8,6	6,8	12,1	9,0
3:00	12,9	9,8	26,7	16,0	19,0	12,3	17,9	12,2	11,9	8,3	11,7	8,8	10,1	7,7
4:00	11,1	16,1	14,6	10,2	14,2	10,4	14,1	9,7	12,5	9,3	13,5	9,5	10,6	8,6
5:00	15,0	10,8	22,1	14,8	20,8	14,1	18,4	12,1	18,6	12,7	14,7	10,8	13,1	10,1
6:00	11,7	8,6	34,8	21,6	31,6	18,9	22,2	14,7	19,4	13,3	17,4	12,6	12,1	9,3
7:00	17,9	12,0	28,5	14,0	35,1	21,6	15,8	10,9	22,1	15,0	16,4	12,0	15,4	11,5
8:00	14,1	10,2	42,0	17,9	27,9	18,1	15,9	11,2	18,8	13,2	20,6	14,7	16,0	11,8
9:00	10,9	8,5	40,2	17,0	28,2	17,7	13,2	9,8	21,1	14,3	19,5	14,0	20,2	14,6
10:00	10,9	8,6	26,6	16,7	21,5	14,0	11,2	8,3	20,1	14,1	19,6	13,8	26,9	18,0
11:00	14,2	10,1	17,4	12,5	20,3	13,2	10,2	7,9	17,1	12,7	24,7	16,8	20,6	14,6
12:00	17,9	12,9	15,6	11,8	20,3	13,6	12,7	9,8	17,0	12,9	19,0	14,1	16,7	12,6
13:00	13,6	10,2	18,5	13,7	23,4	15,2	15,7	11,8	20,1	15,0	23,0	16,5	19,8	14,5
14:00	9,0	7,4	17,2	12,7	20,2	14,4	14,4	10,5	23,4	16,3	25,9	18,0	20,0	14,9
15:00	9,6	7,3	15,7	11,5	20,8	14,6	12,6	9,1	23,3	16,0	23,1	16,3	16,4	12,5
16:00	13,7	9,7	14,5	10,6	22,2	15,1	14,4	9,9	27,2	17,7	19,3	13,5	12,1	9,4
17:00	22,3	11,3	17,1	12,0	29,6	17,2	10,9	8,2	19,7	14,1	15,2	11,3	10,4	8,0
18:00	65,9	33,8	17,3	12,1	23,6	15,0	8,7	6,8	18,2	13,1	17,4	11,9	17,7	12,5
19:00	28,4	16,7	25,5	16,6	25,3	16,4	13,0	9,9	13,3	10,1	14,7	10,9	14,4	10,6
20:00	30,0	18,1	30,1	19,0	17,6	11,7	14,2	10,6	15,3	11,4	17,8	12,6	14,5	10,8
21:00	31,5	19,2	24,2	15,9	21,5	13,7	8,4	6,5	13,1	9,9	12,4	9,2	17,8	13,1
22:00	50,5	27,0	21,3	14,8	13,8	10,1	10,7	7,7	15,1	10,8	14,2	10,5	19,5	13,9
23:00	21,9	13,3	23,5	15,7	27,8	17,4	8,2	6,4	9,5	7,5	13,8	10,2	19,4	14,0

Así mismo, en la gráfica 11 se puede evidenciar el comportamiento horario de la fracción gruesa y fina de material particulado. De acuerdo a la información presentada, se puede observar que las mayores concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ se presentan entre las 6:00 y 8:00 de la mañana, conocida como “hora pico”, periodo en el que se considera un aumento en la circulación de las fuentes móviles en la ciudad de Cali debido a que estos se dirigen a sus destinos laborales.

Figura 13.

Comportamiento horario de material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$



Por otra parte, y a pesar de que las concentraciones no son tan altas en comparación con las horas picos, de las 20:00 a las 22:00 en horas de la noche, se evidencia una elevación en dichas concentraciones, este aumento puede estar provocado debido a que el pico y placa es levantado en la ciudad de Cali y muchos vehículos salen a circulación ya sea para retornar a sus hogares o realizar alguna actividad. Así mismo, es posible observar que entre las 22:00 y las 0:00 se evidencia una disminución en las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$, debido a que la ciudad se encuentra descanso para retomar al día siguiente. Igualmente, se muestra que las menores concentraciones de dicha fracción se presenta entre las 3:00 y 4:00 de la mañana hasta que aumentan paulatinamente, conforme se van desarrollando múltiples actividades en la ciudad.

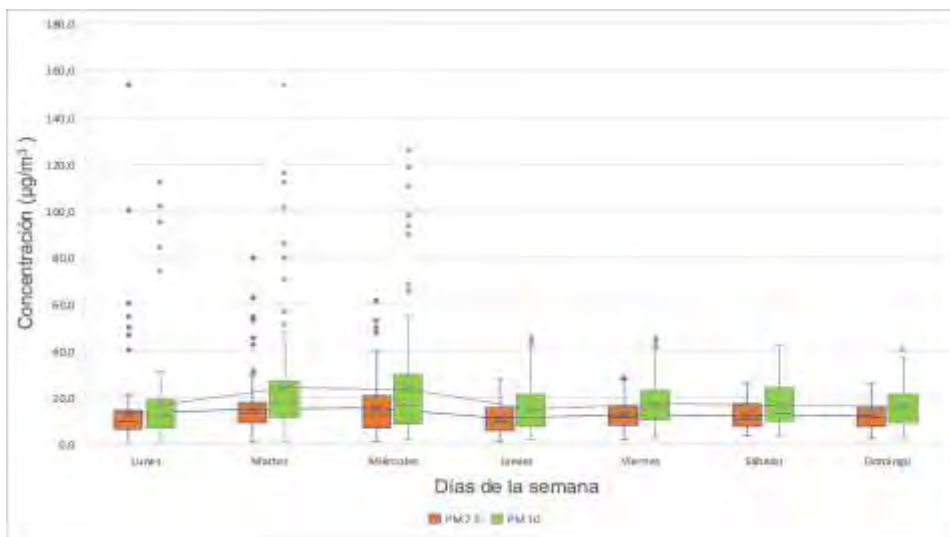
Adicionalmente, en la gráfica 12 se presentan los diagramas de cajas y bigotes con la tendencia horaria de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ de lunes a domingo en la entrada de la universidad Autónoma de Occidente (punto A). El análisis de la

dispersión de los datos se llevó a cabo para toda la semana, presentándose algunas concentraciones atípicas los días lunes mayores a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la fracción fina y $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la fracción gruesa. Estos valores atípicos pueden ser causa de vehículos livianos en mal estado como (automóviles y motos) o vehículos pesados que en su mayoría operan con combustible Diésel, estas concentraciones atípicas fueron encontradas también en estudios realizados por Taheri et al.,(2019) encontrando que el principal contribuyente de material particulado 2,5 y carbón negro son los vehículos pesados. Así mismo, es posible evidenciar que los días martes, miércoles y jueves son los días que se tiene más incremento de material particulado grueso y fino

Además, al revisar los datos históricos de las concentraciones de PM_{10} en la ciudad de Cali reportados por el DAGMA (2021) muestra que los mayores incrementos de material particulado se presentan los días miércoles, jueves y viernes al igual que lo encontrado en el presente estudio, a excepción del día viernes. Esto se puede relacionar con las restricciones de movilidad decretadas en la ciudad de Santiago de Cali en donde hubo cierre de diferentes establecimientos y varios sectores económicos, así como la implementación de toques de quedas durante los fines de semana (Departamento del Valle del Cauca, 2021), lo que ocasionó una disminución en la densidad vehicular en el área de estudio. Teniendo en cuenta esto, se puede comprobar de esta manera que existe una relación directa entre las fuentes móviles y el aumento en las concentraciones de material particulado

Figura 14.

Tendencia de las concentración de PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ para los días de la semana



4.5 TENDENCIA DE LAS CONCENTRACIONES HORARIAS PARA LOS DÍAS DE LA SEMANA DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ Y PM_{2,5} EN EL PUNTO B

La tabla 11 presenta las concentraciones promedio horarias de material particulado PM₁₀ y PM_{2,5} en el punto B para todos los días de la semana. Para el muestreo en el punto B las concentraciones de la fracción gruesa y fina de materia particulado estuvieron en el rango de 5,2 y 18,9 µg/m³ para PM₁₀ y 4,1 a 13,8 µg/m³ para PM_{2,5}, presentándose la concentración máxima el día miércoles para PM₁₀ y el día jueves para PM_{2,5}, mientras que los valores más bajos de la fracción gruesa y fina de material particulado se presentaron los días jueves para ambas fracciones. Así mismo, es posible evidenciar que llegando el fin de semana, las concentraciones de material particulado empiecen a descender debido a que los fines de semana se presenta una disminución en la circulación del parque automotor.

Tabla 11.

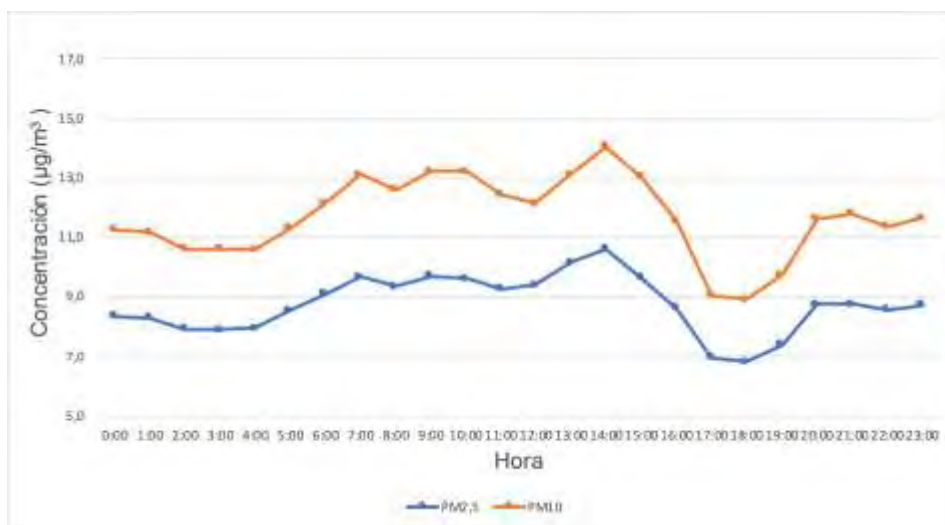
Concentración horaria de material particulado PM₁₀ y PM_{2,5} en el punto B

	<i>Lunes</i>		<i>Martes</i>		<i>Miércoles</i>		<i>Jueves</i>		<i>Viernes</i>		<i>Sábado</i>		<i>Domingo</i>	
	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5
0:00	14,1	10,6	10,2	7,7	12,2	9,3	14,3	9,6	7,2	5,5	9,4	7,2	11,4	8,6
1:00	13,9	10,4	10,4	7,9	13,0	9,8	14,1	9,5	7,6	5,6	9,4	7,2	9,8	7,5
2:00	12,2	9,2	9,7	7,6	11,5	8,7	13,3	8,9	7,1	5,4	10,5	8,1	9,9	7,6
3:00	10,9	8,2	10,7	8,2	11,0	8,3	14,5	9,7	6,1	4,7	12,0	9,1	9,0	7,0
4:00	10,4	7,8	10,4	8,1	11,4	8,6	12,7	8,9	7,1	5,4	12,8	9,6	9,4	7,3
5:00	11,0	8,3	11,9	9,5	12,3	9,3	13,9	9,8	6,8	5,5	13,1	9,8	10,0	7,8
6:00	10,8	8,1	14,7	11,5	13,0	9,7	14,8	10,6	6,2	5,0	15,7	11,4	9,7	7,5
7:00	13,5	9,8	13,4	10,7	16,0	11,4	13,8	9,6	9,8	7,5	15,0	11,1	10,1	7,7
8:00	12,1	8,7	15,0	11,6	14,9	10,9	12,5	8,9	9,2	7,1	13,5	10,1	11,0	8,3
9:00	10,1	7,6	15,2	11,6	15,7	10,9	11,5	8,2	11,0	8,2	14,0	10,4	15,0	10,9
10:00	8,5	6,7	12,0	9,6	15,7	10,8	12,5	8,5	10,7	8,1	15,9	11,3	17,3	12,1
11:00	9,5	7,4	10,0	8,5	15,1	10,3	13,8	9,8	9,8	7,7	17,1	12,2	11,7	8,9
12:00	10,7	8,3	11,8	10,0	13,3	9,7	12,3	9,2	10,9	8,7	13,3	10,1	12,7	9,7
13:00	9,9	7,8	12,9	10,8	13,4	10,4	12,4	9,3	12,3	9,6	15,6	11,6	15,4	11,4
14:00	8,5	6,9	12,3	10,0	16,3	11,7	13,0	9,5	14,4	10,8	18,6	13,8	15,3	11,5
15:00	9,1	7,2	10,4	8,5	18,9	12,9	11,8	8,3	10,2	7,8	17,8	13,1	12,9	9,7
16:00	10,7	8,0	8,5	7,1	17,9	12,4	9,2	6,6	10,7	8,0	14,0	10,4	9,9	7,6
17:00	9,6	7,3	8,3	6,9	13,4	9,8	6,4	4,9	8,6	6,6	8,6	6,5	8,4	6,5
18:00	8,7	6,7	8,9	7,3	11,5	8,3	5,2	4,1	9,3	7,1	9,1	7,0	9,7	7,3
19:00	9,4	6,8	11,5	9,3	12,1	8,5	6,9	5,5	7,9	6,2	10,5	8,0	9,7	7,4
20:00	11,5	8,4	12,8	10,3	13,7	9,7	7,8	6,2	12,6	9,3	12,1	9,0	10,9	8,3
21:00	11,3	8,3	12,8	10,1	14,8	9,8	7,6	6,0	10,5	8,1	11,1	8,4	14,3	10,6
22:00	9,9	7,6	12,4	9,9	14,2	9,8	8,2	6,3	11,0	8,4	11,3	8,6	12,5	9,5
23:00	9,3	7,2	12,8	10,3	15,3	10,4	8,8	6,4	10,5	8,0	12,0	9,1	12,9	9,7

Por otra parte, en la gráfica 13 se presenta el comportamiento horario de las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$. Según los datos obtenidos se puede observar que al igual que en el punto A, a las 4:00 de la mañana las concentraciones de material particulado para las dos fracciones empieza a incrementarse paulatinamente, debido a que aumenta la circulación del parque automotor ya que las personas empiezan a dirigirse a sus destinos laborales. Así mismo, es posible evidenciar que las mayores concentraciones se presentan entre las 12:00 y las 14:00 de la tarde, conocida como “hora pico”, puesto que es un periodo en que las personas se dirigen a sus hogares y retornan de nuevo a sus trabajos, por otra parte, después de las 14:00 hasta las 16:00 pm las concentraciones de material particulado comienzan a disminuir, posiblemente, a causa de que en esa franja se encuentran en periodos laborales disminuyendo la presencia de fuentes móviles en las vías.

Figura 15.

Comportamiento horario de material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en el punto B



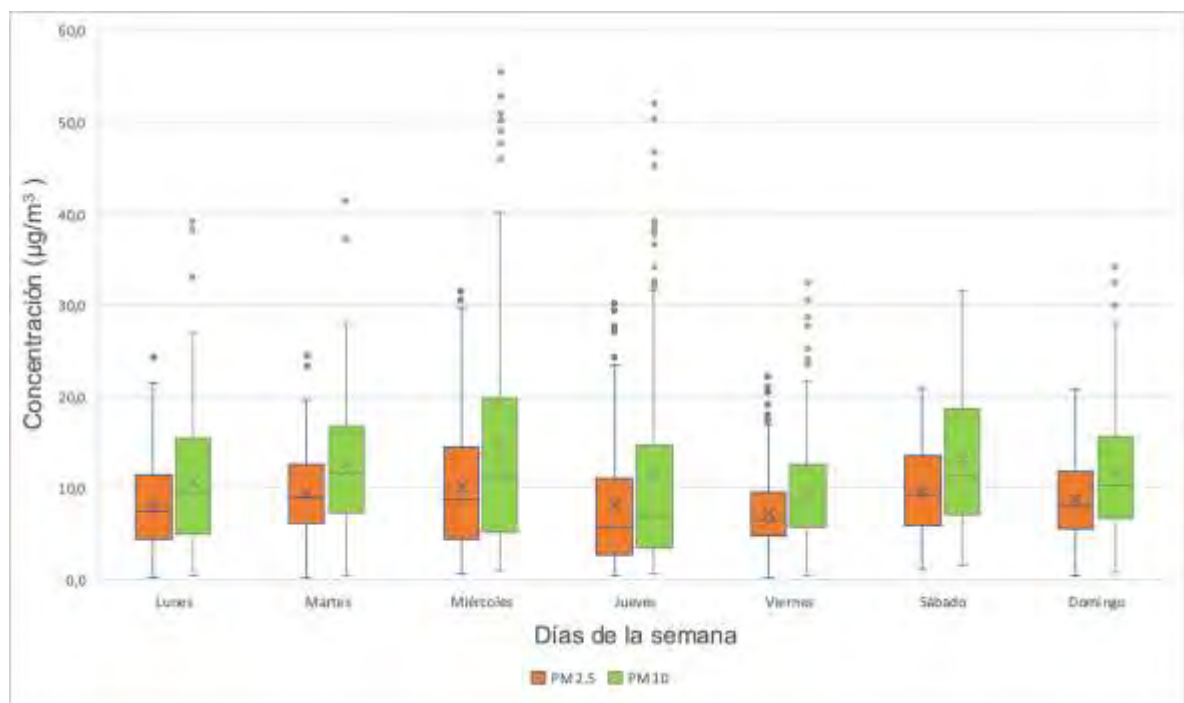
En cuanto a las concentraciones más bajas, éstas se presentaron entre las 16:00 y las 18:00 de la noche, esto es posible, teniendo en cuenta, de que el punto B se encuentra mas lejano a la vía principal en comparación con el punto A, además, este punto se encuentra cercano a la cra.115 la cual es una vía con poco flujo de circulación de fuentes móviles.

Por otra parte, en la gráfica 14 se presenta los diagramas de cajas y bigotes con la tendencia horaria de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ para toda la semana en el punto B. Se muestra que los días miércoles y sábado presentan las más altas concentraciones de material particulado, y las menores concentraciones los días

domingos y lunes, estos resultados coinciden con los encontrados por Zhao et al., (2018) en donde se encontró que es más probable que las alta concentraciones de material particulado aparezcan los sábados en lugar del viernes, además se halló, que aparte del domingo, es probable que las menores concentraciones para dicha fracción se produzcan los lunes.

Figura 16.

Tendencia de las concentración de PM_{10} y $PM_{2,5}$ para los días de la semana en el punto B



Así mismo, los valores promedios de PM_{10} y $PM_{2,5}$ fueron menores a 20 y 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, este comportamiento, es similar a lo encontrado en el punto A, lo que indica que no se está excediendo la norma diaria de la calidad del aire para Colombia (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2017). Por otro lado, la mayor concentración atípica se presentó el día miércoles.

4.6 TENDENCIA DE LAS CONCENTRACIONES HORARIAS PARA LOS DÍAS DE LA SEMANA DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ Y PM_{2,5} EN EL PUNTO C

La tabla 12 presenta las concentraciones promedio horarias de material particulado PM₁₀ y PM_{2,5} en el punto C. Las concentraciones de estas fracciones para este punto estuvieron en el rango de 2,9 a 15,7 µg/m³ donde la mayor concentración se registro el día miércoles a las 15:00 pm con un valor de 15,1 µg/m³ para PM₁₀ y 12,1 µg/m³ el día sábado para PM_{2,5}, las concentraciones más bajas de la fracción fina y gruesa se registraron el día jueves y viernes respectivamente.

Tabla 12.

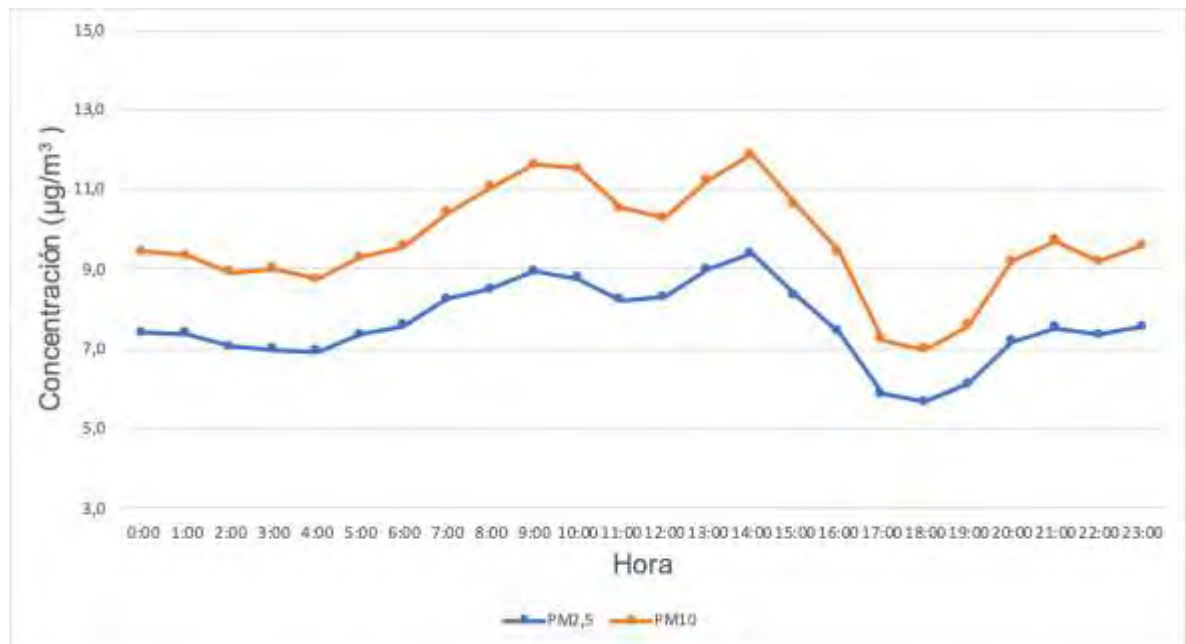
Concentración horaria de material particulado PM₁₀ y PM_{2,5} en el punto C

	<i>Lunes</i>		<i>Martes</i>		<i>Miércoles</i>		<i>Jueves</i>		<i>Viernes</i>		<i>Sábado</i>		<i>Domingo</i>	
	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5
0:00	11,6	9,2	8,5	6,7	10,8	8,5	12,4	8,7	5,5	4,8	7,6	6,1	9,6	7,7
1:00	11,4	9,0	8,7	7,1	11,0	8,7	12,5	8,8	6,1	5,1	7,6	6,2	8,1	6,6
2:00	10,0	8,2	8,6	6,8	9,3	7,4	11,7	8,2	5,6	4,8	8,7	7,1	8,5	6,9
3:00	8,8	7,1	9,1	7,0	9,1	7,2	13,1	9,0	4,7	4,2	10,4	8,1	7,8	6,3
4:00	8,7	6,9	8,6	6,8	9,5	7,5	10,8	7,9	4,9	4,4	10,8	8,5	8,0	6,5
5:00	8,8	7,0	9,5	7,6	10,1	7,9	11,9	8,7	5,1	4,7	11,1	8,8	8,3	6,8
6:00	8,0	6,4	12,2	9,4	10,8	8,4	12,1	9,1	4,5	4,1	11,1	8,9	8,1	6,7
7:00	11,0	8,4	11,4	9,1	12,2	9,4	11,3	8,4	6,9	6,3	11,8	9,4	8,0	6,5
8:00	10,3	7,8	13,6	10,3	13,1	9,9	12,6	8,7	7,3	6,5	11,2	8,8	9,3	7,4
9:00	8,7	6,9	14,1	10,6	13,4	10,1	10,6	7,9	9,5	7,9	12,0	9,5	12,8	9,9
10:00	7,2	5,9	11,1	8,7	13,8	9,9	11,3	8,0	9,2	7,7	13,4	10,3	14,7	10,9
11:00	8,0	6,5	9,3	7,5	13,6	9,7	10,3	7,8	8,0	7,1	14,4	10,9	10,1	8,1
12:00	9,0	7,5	11,2	8,9	11,8	8,8	8,9	7,1	9,3	8,2	11,1	8,9	10,7	8,6
13:00	8,3	6,9	12,2	9,7	11,6	9,0	10,8	8,3	10,1	8,8	13,0	10,2	12,7	10,0
14:00	7,0	6,0	10,6	8,6	14,2	10,5	11,2	8,6	11,5	9,7	15,0	12,1	12,7	10,0
15:00	7,4	6,2	9,3	7,5	15,1	11,2	9,8	7,3	7,9	6,6	14,4	11,2	10,5	8,4
16:00	8,6	6,8	7,4	6,2	15,1	11,1	7,6	5,6	7,8	6,8	11,3	8,8	8,3	6,7
17:00	7,0	5,8	6,9	5,9	11,5	8,7	4,7	3,7	7,0	6,0	6,7	5,4	6,8	5,5
18:00	6,8	5,5	6,7	5,6	9,5	7,2	3,4	2,9	6,9	5,9	7,1	5,7	8,5	6,6
19:00	8,3	6,5	9,0	7,1	9,7	7,2	4,8	4,1	6,1	5,5	7,9	6,5	7,2	5,9
20:00	9,0	6,9	10,3	8,2	12,2	8,3	6,0	5,0	9,4	7,7	9,2	7,4	8,1	6,6
21:00	9,4	7,2	10,3	8,1	12,7	8,5	6,0	5,1	9,3	7,5	8,9	7,2	11,3	8,9
22:00	8,2	6,7	10,6	8,5	11,5	8,3	6,8	5,5	8,4	7,1	9,0	7,3	9,7	8,0
23:00	7,7	6,0	11,1	8,9	12,5	9,1	6,8	5,4	8,5	6,9	10,1	8,1	10,4	8,3

Por otro lado, en la gráfica 15 se presenta el comportamiento horario de las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en el punto C. El comportamiento horario de PM_{10} y $PM_{2,5}$ evidencia que al igual que en el punto A y B las concentraciones de ambas fracciones empieza a aumentar de las 4:00 a las 9:00 de la mañana, esto posiblemente se relaciona con las horas de mayor congestión de los usuarios que demandan un gran número de vehículos particulares y públicos (MIO) que se movilizan por la zona de estudio. Así mismo, se observa que las concentraciones en el punto C, son mayores en horas picos de la mañana y el medio día, mientras que las concentraciones más bajas se presentan entre las 16:00 y 18:00 pm teniendo valores menores de $7,0 \mu g/m^3$.

Figura 17.

Comportamiento horario de material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ en el punto C



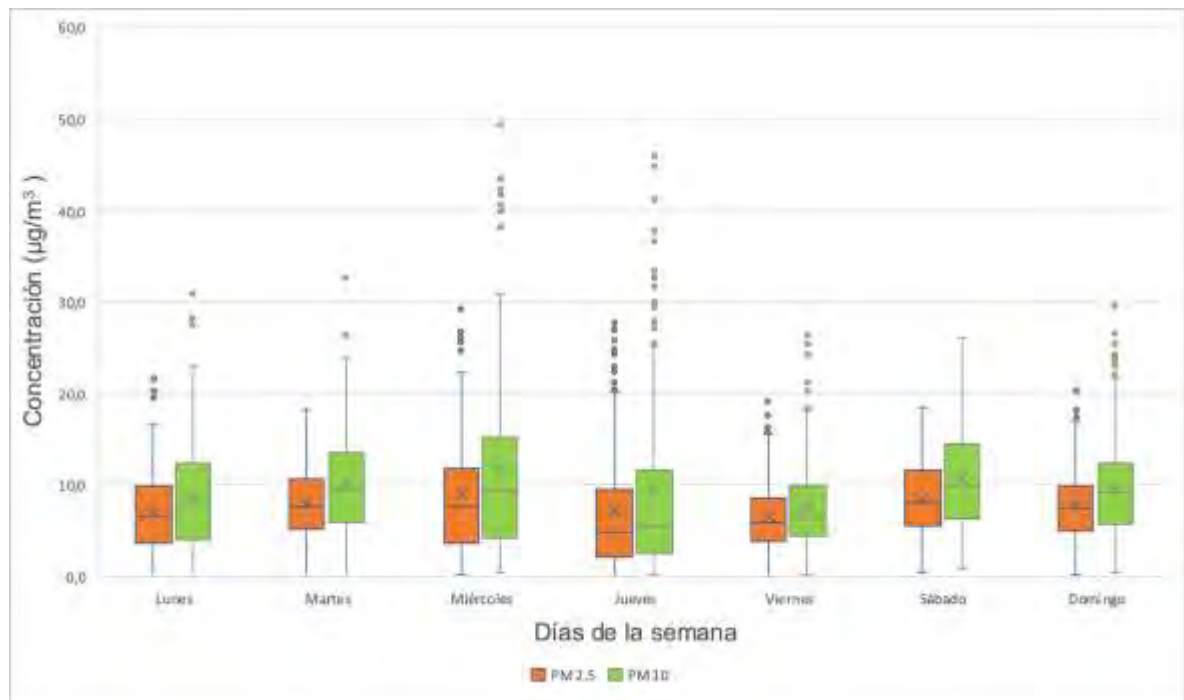
La gráfica 16 presenta los diagramas de cajas horarios de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ en la calle 42. El análisis de la dispersión de los datos se realizó para los días de lunes a domingo, presentándose concentraciones atípicas los días martes y miércoles mayores a $40 \mu g/m^3$, sin embargo, la tendencia de las concentraciones indica que no se excedió en ningún momento la norma diaria de la calidad del aire de $37 \mu g/m^3$ para $PM_{2,5}$ y $75 \mu g/m^3$ para PM_{10} .

La mayor concentración de PM_{10} y $PM_{2,5}$ se presentó el día miércoles al igual que en el punto A y B, por otro lado, el día sábado y domingo presentan tendencias

parecidas tanto en el punto A y B como en el C. Así mismo, es posible evidenciar que el día sábado y domingo se presenta una disminución en las concentraciones de la fracción gruesa y fina de material particulado debido a que los fines de semana se reduce el flujo vehicular puesto que son día no laborales con respecto al flujo vehicular que se presenta en días laborales.

Figura 18.

Tendencia de las concentración de PM_{10} y $PM_{2.5}$ para los días de la semana en el punto C



5. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió realizar mediciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ en el área de influencia, en donde se pudo evidenciar según los resultados obtenidos en dichas mediciones que las fuentes móviles generan un aumento en las concentraciones de material particulado, así mismo, se encontró que las personas están expuestas a concentraciones promedias de PM_{10} y $PM_{2,5}$ menores a $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, niveles que no exceden la norma diaria de calidad del aire para contaminantes criterios establecida en la resolución 2254 de 2017, sin embargo, cabe resaltar que el estudio se realizó bajo condiciones atípicas de circulación vehicular debido a la pandemia del Covid-19. De esta misma manera, a pesar de que las concentraciones obtenidas durante el periodo de medición no sobrepasaron la norma, hay que tener en cuenta que la mala calidad del aire en Cali es una arma mortal y silenciosa que causa daños irreversibles en la salud de las personas a largo plazo.

Además, se pudo establecer que las mayores concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ se encontraron en el punto A el cual fue el sitio más cercano a la vía panamericana, con niveles mayores a los $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estas concentraciones se relacionan con el alto tráfico vehicular que se presenta en esta zona, que además, genera una disminución de la velocidad, ocasionando entonces una liberación adicional de partículas debido al aumento de la frecuencia parada-arranque, por otro lado, las menores concentraciones se encontraron en el punto C el cual fue el punto más alejado de la vía panamericana. Con los resultados obtenidos de las comparaciones de cada punto de monitoreo de material particulado, se puede decir que las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ están asociadas a la distancia que hay entre el punto y una vía de alto flujo vehicular y a actividades presentadas cerca al lugar de monitoreo.

En cuanto a la relación de $PM_{2,5}/PM_{10}$ se obtuvo una relación superior a 0,60 lo que afirma que las concentraciones obtenidas durante el muestreo son producidas bajo la influencia de fuentes de combustión, sin embargo, se pudo evidenciar que el punto A el cual es el punto más cercano a la vía Jamundí tuvo el menor valor comparado con el punto B y C, dicho resultado se asocia debido a que en el periodo de medición, la vía panamericana se encontraba bajo extensos trabajos de construcción vial, lo que afectó la relación de $PM_{2,5}/PM_{10}$ en dicho punto. En cuanto al coeficiente de Pearson se obtuvieron valores de 0,989, 0,995 y 0,991 en el punto A, B y C respectivamente, lo que permite confirmar que es posible obtener o predecir adecuadamente los datos de la fracción fina de material particulado a partir de los datos de la fracción gruesa.

Por otro lado, a nivel diario las máximas concentraciones se registraron los días miércoles y jueves entre las 6:00 y 8:00 de la mañana, conocida como “hora pico”, el cual es un periodo en el que se considera un aumento en la circulación de las fuentes móviles debido a que estos se dirigen a sus destinos laborales. De esta misma manera, fue posible evidenciar que los días viernes, sábado y domingo presenta una disminución en la concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ asociadas a las medidas de aislamiento impuestas en la ciudad de Cali los fines de semana, que ocasiono una restricciones vehicular.

REFERENCIAS

- Amato, F., Pandolfi, M., Viana, M., Querol, X., Alastuey, A., y Moreno, T. (2008). *Spatial and chemical patterns of PM₁₀ in road dust deposited in urban environment*. 43. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.12.009>
- Asociación Interamericana de Defensa Ambiental. (2019). *Seminario virtual “Por un aire limpio: Poniendo a raya a la contaminación” | Interamerican Association for Environmental Defense (AIDA)*. <https://aida-americas.org/es/blog/seminario-virtual-por-un-aire-limpio-poniendo-rama-a-la-contaminacion>
- Castelar, A. (2019). *Comparación entre tres muestreadores de material particulado (PM_{2.5}) en el campus de la UNALM*. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/4186>
- Chun, B., Choi, K., y Pan, Q. (2020). The nexus between PM_{2.5} and urban characteristics in the Texas triangle region. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 78, 102187. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.11.016>
- Cifuentes, L., y Paz, L. (2015). *Estudio de movilidad para la vía Cali-Jamundi entre carrera 102 y 122*. http://vitela.javerianacali.edu.co/bitstream/handle/11522/4176/Estudio_movilidad_via_cali.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- DAGMA. (2017). Fuentes de Emisiones en Santiago de Cali Episodio crítico de Contaminación. *Alcaldía de Santiago de Cali*. https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.154855!/Day1_1_GArizabaleta.pdf
- Departamento administrativo de gestión del medio ambiente. (2021). DAGMA. <https://www.cali.gov.co/dagma/>
- Departamento del Valle del Cauca. (2021). *Por medio del cual se decreta el toque de queda en el departamento del Valle del Cauca frente al Coronavirus Covid-19 y se dictan otras disposiciones, Decreto 1-3-0691 de 18 de marzo de 2021*. <https://www.valledelcauca.gov.co/loader.php?IServicio=Tools2&ITipo=descargas&IFuncion=visorpdf&id=42092&pdf=1>

- DNP. (2018). *DNP revela que 51% de los colombianos percibe la contaminación del aire como el mayor problema ambiental*. Departamento Nacional de Planeación. <https://doi.org/https://www.dnp.gov.co/Paginas/DNP-revela-que-51-de-los-colombianos-percibe-la-contaminación-del-aire-como-el-mayor-problema-ambiental.aspx>
- Echeverri, C. A. (2000). Determinación de las concentraciones de fondo de material particulado en suspensión en la ciudad de Medellín. *Revista Facultad de Ingeniería*, 20, 7–19. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/325839/20783187>
- Echeverri Londoño, C., y Maya Vasco, G. (2008). Relación entre las partículas finas (PM 2.5) y respirables PM 10) en la ciudad de Medellín. *Relación entre las partículas finas (PM 2.5) y respirables PM 10) en la ciudad de Medellín*, 7(12), 23–42. <http://ref.scielo.org/q3bw8j>
- Environmental Protection Agency. (2018). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*. EPA. <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles#PMç>
- Feenstra, B., Papapostolou, V., Hasheminassab, S., Zhang, H., Boghossian, B. Der, Cocker, D., y Polidori, A. (2019). Performance evaluation of twelve low-cost PM2.5 sensors at an ambient air monitoring site. *Atmospheric Environment*, 216, 116946. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116946>
- Garcia, F. F., Agudelo, R. D., y Jimenez, K. M. (2006). Distribución espacial y temporal de la concentración de material particulado en Santa Marta, Colombia. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, 73–82. <https://www.redalyc.org/pdf/120/12024208.pdf>
- González, L. (2018). *Estimacion de la emisión anual de PM10 provenientes de las fuentes móviles en vías de alto tráfico de Barranquilla por medio de un inventario de emisiones con el modelo IVE*. <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/48/1192907882.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Habitat Map. (2021). *Airbeam - Guía del usuario*.

<https://www.habitatmap.org/airbeam/users-guide>

Han, S., y Sun, B. (2019). Impact of population density on PM_{2.5} concentrations: A case study in Shanghai, China. *Sustainability (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/su11071968>

Instituto Nacional de Salud. (2019). *Informe Carga de Enfermedad Ambiental en Colombia*. <https://www.ins.gov.co/Noticias/Paginas/Informe-Carga-de-Enfermedad-Ambiental-en-Colombia.aspx>

Krudysz, M. A., Froines, J. R., Fine, P. M., y Sioutas, C. (2008). Intra-community spatial variation of size-fractionated PM mass, OC, EC, and trace elements in the Long Beach, CA area. *Atmospheric Environment*, 42(21), 5374–5389. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2008.02.060>

Larsen, B. (2003). Hygiene and health in developing countries: Defining priorities through cost-benefit assessments. *International Journal of Environmental Health Research*, 13(SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1080/0960312031000122172>

Lim, C. C., Kim, H., Vilcassim, M. J. R., Thurston, G. D., Gordon, T., Chen, L. C., Lee, K., Heimbinder, M., y Kim, S. Y. (2019). Mapping urban air quality using mobile sampling with low-cost sensors and machine learning in Seoul, South Korea. *Environment International*, 131, 105022. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105022>

Londoño, J., Correa, A. M., y Palacio, C. A. (2011). *Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia*. <https://repository.eia.edu.co/flip/index.jsp?pdf=/bitstream/handle/11190/149/REI00168.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial. (2008). *Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial*.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2010). Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. En *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire*. <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/Protocolo+para+el+Monito>

reo+y+seguimiento+de+la+calidad+del+aire.pdf/6b2f53c8-6a8d-4f3d-b210-011a45f3ee88

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2017). *Resolución 2254 del 2017*.
<https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res-2254-de-2017.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *DIAGNÓSTICO NACIONAL DE SALÚD AMBIENTAL*.
<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico-de-salud-Ambiental-compilado.pdf>

Ministerio para el Medio Ambiente. (2016). *Calidad del Aire y Educación Ambiental*.
<https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/08/Guia-para-Docentes-Sobre-Calidad-del-Aire-003.pdf>

Observatorio de movilidad sostenible. (2018). *Observatorio MOVIS: Tasa de Crecimiento del Parque Automotor (Autos y Motos)*.
<https://www.cali.gov.co/observatorios/publicaciones/142339/observatorio-movis-tasa-de-crecimiento-del-parque-automotor-autos-y-motos/>

Pinzon, T., y Arias, J. J. (2016). *Contaminación vehicular en la conurbación Pereira-Dos Quebradas*. <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n37/n37a09.pdf>

Piotrowicz, A., y Polednik, B. (2019). Exposure to aerosols particles on an urban road. *Journal of Ecological Engineering*, 20(5), 27–34.
<https://doi.org/10.12911/22998993/105329>

Pope, F. D., Gatari, M., Ng'ang'a, D., Poynter, A., y Blake, R. (2018). Airborne particulate matter monitoring in Kenya using calibrated low-cost sensors. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(20), 15403–15418.
<https://doi.org/10.5194/acp-18-15403-2018>

Querol, X., Alastuey, A., Ruiz, C. R., Artiñano, B., Hansson, H. C., Harrison, R. M., Buringh, E., Ten Brink, H. M., Lutz, M., Bruckmann, P., Straehl, P., y Schneider, J. (2004). Speciation and origin of PM₁₀ and PM_{2.5} in selected European cities. *Atmospheric Environment*, 38(38), 6547–6555.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.08.037>

- Ramírez, C., Acevedo Bohórquez, J., Pablo, J., Suescún, B., y Miguel Velásquez, J. (2013). *Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia*. <https://prosperityfund.uniandes.edu.co/site/wp-content/uploads/Caracterización-de-la-contaminación-atmosférica-en-Colombia.pdf>
- Rojas, N., Rojas, N., y Galvis, B. (2006). Relación entre PM_{2.5} y PM₁₀ en la ciudad de Bogotá. *Revista de Ingeniería*, 0(22), 52-58–58. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i22.371>
- Salazar Ceballos, A., y Álvarez Miño, L. (2011). Los efectos del material particulado 10 (PM₁₀) y de las variables climatológicas en las admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias en niños en la ciudad de Santa Marta, Colombia, 2008-2009. *Duazary*, 8(2), 127–142. <https://doi.org/10.21676/2389783X.210>
- Taheri, A., Aliasghari, P., y Hosseini, V. (2019). Black carbon and PM_{2.5} monitoring campaign on the roadside and residential urban background sites in the city of Tehran. *Atmospheric Environment*, 218, 116928. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116928>
- Valdivia, S. A. P. (2016). Analisis Temporal Y Espacial De La Calidad Del Aire Determinado Por Material Particulado Pm₁₀ Y Pm_{2.5} En Lima Metropolitana. *Anales Científicos*, 77(2), 273–283.
- Zhao, N., Liu, Y., Vanos, J. K., y Cao, G. (2018). Day-of-week and seasonal patterns of PM_{2.5} concentrations over the United States: Time-series analyses using the Prophet procedure. *Atmospheric Environment*, 192(April), 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.050>